

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogainstituut

Martin Laidma

**JUHTELEKTROONIKA MITMELIIGILISTE DEFORMATSIOONISENSORITE
MAATRIKSILE**

Bakalaureusetöö (12EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

Doktorant Kaur Leemets

Tartu 2017

Resümee/Abstract

Juhtelektroonika mitmeliigiliste deformatsioonisensorite maatriksile

Liikumise jäädvustamiseks ja kolmedimensionaalsete objektide jälgimiseks ruumis kasutatakse tänapäeval kalleid ja tihti ka ebatäpseid lahendusi. Tartu Ülikooli Arukate Materjalide ja Süsteemide laboris on välja töötatud sensorid, millega on võimalik samaaegselt mõõta painet ja venitust ning loodetavasti tulevikus pakkuda konkurentsi erinevatele *motion capture* süsteemidele. Selle hüpoteesi kontrollimiseks on vaja süsteemi, mis võimaldab sensoreid testida, sooritada mõõtmisi ja koguda andmeid paljudelt sellistel ühte võrgustikku ühendatud sensoritelt.

Selle bakalaureustöö eesmärk on disainida ja luua sensorite mõõtmiseks juhtseade, selle juurde kuuluva tarkvara ja dokumentatsiooniga selliselt, et valminud seadet oleks võimalik kasutada eelnimetatud sensorite võrgustiku mõõtmiseks reaajaliselt, vähemalt 60 korda sekundis.

CERSC: T120, T121, T150, T152, T170

Märksõnad: sensorvõrk, deformatsioonisensor, elektroonika

Electronics design for a network of multimodal deformation sensors

The capture of motion and deformation of three dimensional objects in space requires expensive and often inaccurate systems. In the Laboratory of Intelligent Materials and Systems of University of Tartu an alternative is being developed – a network of multimodal deformation sensors that allow simultaneous measurements of elongation and bending. To test this hypothesis, a system to connect and measure these sensors and networks of these sensors is required.

The goal of this thesis is to develop and evaluate an electronic device along with its firmware and documentation. The device must be designed to allow real time measurements of the sensor network with a frequency of at least 60 times per second.

CERCS: T120, T121, T150, T152, T170

Keywords: sensor network, deformation sensors, electronics

Sisukord

Resümee/Abstract.....	2
Jooniste loetelu.....	5
Tabelite loetelu.....	5
Lühendid ja terminid	6
1 Sissejuhatus	7
2 Süsteemi kirjeldus	8
2.1 Sensorite ehitus ja tööpõhimõte.....	8
2.2 Sensorvõrgu funktsionaalsed osad.....	9
3 Nõuded	10
3.1 Funktsionaalsed nõuded	10
3.2 Mittefunktsionaalsed nõuded.....	11
4 Disain	12
4.1 Esimene prototüüp.....	12
4.2 Lõppversiooni elektroonika.....	15
4.2.1 Komponentide kirjeldus ja valiku põhimõtted	15
4.2.2 Elektroonika tööpõhimõte ja trükkplaadi disain	17
4.3 Tarkvara.....	20
4.3.1 Suhtlusprotokollid	23
4.4 Edasiarendus ja lõppseade	25
5 Tulemused	26
5.1 Valmis seade.....	26
5.2 Kalibreerimine	27
5.3 Mõõtmistulemused	29
5.3.1 Mahtuvuse muutumine ajas.....	30
5.3.2 Pinge muutumine ajas	31
6 Kokkuvõte	32
7 Viited.....	33
LISA 1. Prototüübi elektroonikaskeem.....	36
LISA 2. Põhisõlme skeemide ülevaade.....	37
LISA 3. Põhisõlme elektroonika: mikrokontroller ja CAN	38
LISA 4. Põhisõlme elektroonika: ADC, Schmitt trigerid ja sensorid	39
LISA 5. Vahesõlme elektroonikaskeem.....	40

LISA 6. Põhisõlm: elektroonikakomponentide nimekiri	41
LISA 7. Vaheõlm: elektroonikakomponentide nimekiri	42
LISA 8. Põhisõlm: trükkplaadi pealmine ja alumine kiht	43
LISA 9. Vaheõlm: trükkplaadi pealmine ja alumine kiht.....	44
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	45

Jooniste loetelu

Joonis 1. Sensori tööpõhimõtte ekvivalentsskeem ja kihtide paigutus sensori ristlõikes.	8
Joonis 2. Sensorvõrgu põhimõtteskeem.	9
Joonis 3. Esimese prototüübi trükkplaat.	12
Joonis 4. Lõppversiooni elektroonika plokskeem.	15
Joonis 5. Põhisõlme ja vahesõlme trükkplaadid sensoriga.	18
Joonis 6. Schmitt triggeritega ahel mahtuvuse mõõtmiseks.	19
Joonis 7. Tarkvara tööd kirjeldav plokskeem.....	21
Joonis 8. Mikrokontrolleri tarkvaras kasutatud staatuslippude kirjeldus.	23
Joonis 9. Valminud sensorvõrgustik nelja põhisõlme ja viie vahesõlmega.	27
Joonis 10. Kalibratsioonisirge mahtuvuse mõõtmiseks.	28
Joonis 11. Kalibratsioonisirge pinge mõõtmiseks.....	29
Joonis 12. Mahtuvuse muutumine ajas.	30
Joonis 13. Pinge muutumine ajas.	31

Tabelite loetelu

Tabel 1. Prototüübi mõõtetulemused	14
Tabel 2. Haldusliidese käsuprotokoll	24
Tabel 3. Viiest kaadrist koosnev andmepakett CAN siinil	25
Tabel 4. Mahtuvuse kalibreerimisel leitud väärtused.....	28
Tabel 5. Pinge kalibreerimisel leitud väärtused	29
Tabel 6. Mõõtmistulemuse pakett haldurilt.....	30

Lühendid ja terminid

Lühendid ja terminid on seletatud esinemise järjekorras.

CAN - *Controller Area Network*, jadasiin andmeedastuseks

VCC – Positiivse toitepinge sisend

GND – *Ground*, maa, punkt elektriskeemis, mille potentsiaali mistahes punkti suhtes samas ahelas loetakse kokkuleppeliselt nulliks.

LDO – *Low-Dropout Regulator*, pingeregulaator

UART – *Universal asynchronous receiver/transmitter*, universaalne asünkroontransiiver

USB – *Universal Serial Bus*, universaalne järjestiksiin

CSV – *Comma-separated values*, failiformaat, kus andmed on komaga eraldatud

SRAM – *Static random-access memory*, staatiline juhupöördusega mälu

SWD – *Serial Wire Debug*, silumisliides

ADC – *Analog-digital converter*, analoog-digitaal muundur

SPI – *Serial Peripheral Interface Bus*, sünkroonne jadasiin

Tx/Rx – *Transmission/Reception*, saatmine/vastuvõtmine

DMA – *Direct Memory Access*, otsemällupöörduskanal

JTAG – *Joint Test Action Group*, silumisliides

LED – *Light Emitting Diode*, valgusdiod

WD – *Watchdog*, valvetaimer

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*, keelemärkide tabel

ID – Identifikaator

1 Sissejuhatus

Alates esimese laiatarbearvuti ehitamisest on tehnoloogia tähtsus inimeste igapäevaelus oluliselt kasvanud. Arvutisüsteeme ja sensoreid kasutatakse, et lihtsustada keeruliste teaduslike probleemide lahendamist, kergendada töökoormat või lahutada meelt. Igapäevaselt puutume multimeedias kokku *motion capture* süsteemide abil loodud animatsioonide ja eriefektidega (1). Sportlased kasutavad keerukaid sensorsüsteeme oma liigutuste jälgimiseks ja võimekuse mõõtmiseks (2). Kasutame igapäevaselt oma nutitelefone suhtlemiseks, kasutame kaardirakendusi oma asukoha määramiseks ja kasutame inertsiaalandureid mängude mängimiseks. Need on vaid mõned näited arvuti ja inimese omavahelisest suhtlusest.

Paljudel mainitud süsteemidel on olulisi puuduseid. Kaamerate ja markeritega *motion capture* süsteemid on väga kallid ning võimaldavad korraga jälgida vähest hulka inimesi või teisi objekte. Iga lisatud objekt lisab süsteemile oluliselt keerukust. Inertsiaalanduritel põhinevad lahendused on tundlikud sensorite triivile, sest ei ole mõõdetavad ühegi absoluutse referentsi suhtes ning on tundlikud mehaanilisele ja elektromehaanilisele mürale (3).

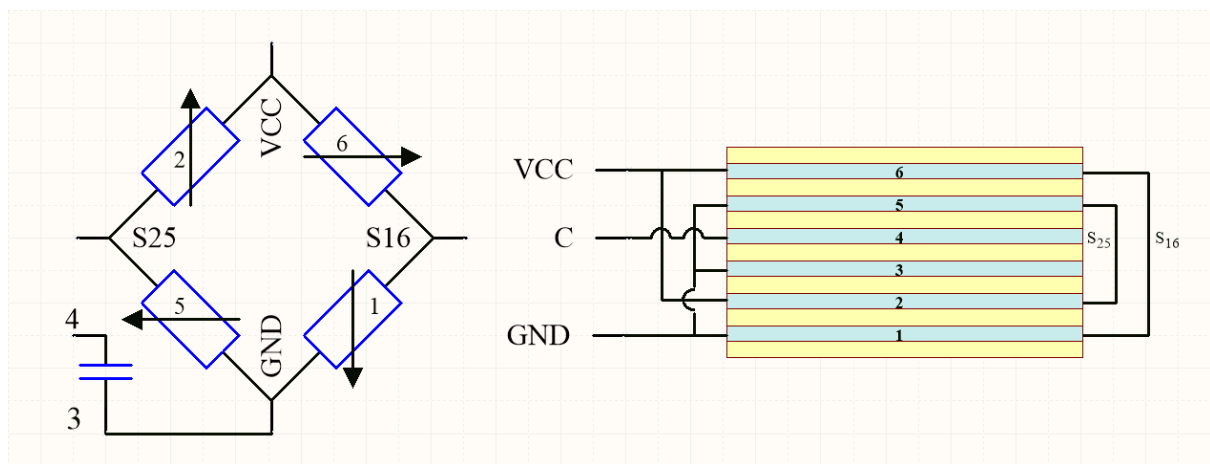
Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on disainida ja seadmestada süsteem, mille abil oleks võimalik mõõta deformatsioonisensorite maatriksit ning edastada reaalsajas, vähemalt 60 korda sekundis, informatsiooni sensorite painderaadiuse ja venituse kohta, et kirjeldada dünaamiliselt mistahes antud maatriksi poolt ümbritsetud kolmemõõtmelist objekti ning selle kuju muutust (4). Kirjeldatud sensoritest ja juhtelektroonikast koosneva süsteemi abil plaanitakse pakkuda alternatiivi praegu laias kasutuses olevatele kallitele lahendustele *motion capture* ja kolmedimensionaalsete mõõtmiste valdkonnas.

Tööpõhimõtte kontrollimiseks ja edasiarenduse rakendatavuse hindamiseks disainiti võrgustik, mille abil on võimalik sooritada mõõtmisi, hinnata komponentide sobivust, testida sensorite ning juhtelektroonika töökindlust, sealhulgas võrgu kalibreeritavust ja täpsete mõõtmistulemuste esitatavust. Töö käigus koostati nimekiri süsteemile esitatavatest nõuetest, disainiti esimene prototüüp ja edasiarendatud elektroonika ning tarkvara. Koostati eeskiri süsteemi kalibreerimiseks, sooritati mõõtmisi ja viidi läbi mõõtmistulemuste ning seadme poolt väljastatud andmete analüüs. Vormistati järeldused ning hinnang töö eesmärgipärasele täitmisele.

2 Süsteemi kirjeldus

2.1 Sensorite ehitus ja tööpõhimõte

Selles töös käsitletud sensorite disain ja tööpõhimõte on kirjeldatud varasemas artiklis (4). Tegemist on kolmeteistkümne kihiliste polüdimetüülsiloksaanist (Quantum Silicone QM240T) komposiitsensoritega (5). Iga sensor koosneb kuuest juhtivast ja seitsmest dielektrilisest vaheldumisi asetsevast kihist. Juhtivuse saavutamiseks on silikooni sisse segatud massi järgi 5% (Baytubes c150p) süsiniknanotorusid, läbimõõduga ligikaudu 13 nm ja pikkusega ligikaudu 1 μm (6). Sensori kontaktideks on elektrookeemiliselt vasega kaetud süsinikmati ribad, mis on juhtivate silikooni kihtide sisse valatud (4). Sensorite kummaski servas on kuus sümmeetriliselt paiknevat kontakti, millest igaüks on ühendatud ühe juhtiva kihiga. Vastaskülje kontaktid paiknevad peegelpildis sensori pikitelje suhtes.



Joonis 1. Sensori tööpõhimõtte elektriline ekvivalentsskeem (vasakul) ja kihtide paigutus sensori ristlõikes (paremal). Illustreerib sensori painde mõõtmiseks kasutatavat Wheatstone mõõtesilda ning mahtuvuse mõõtmiseks kasutatavatest kihtidest moodustuvat kondensaatorit. Ekvivalentsskeemil tähistavad VCC ja GND silla toitesisendeid ning punktid S₂₅ ja S₁₆ on silla mõõteväljundid. Sensorite juhtivad kihid on tähistatud numbritega.

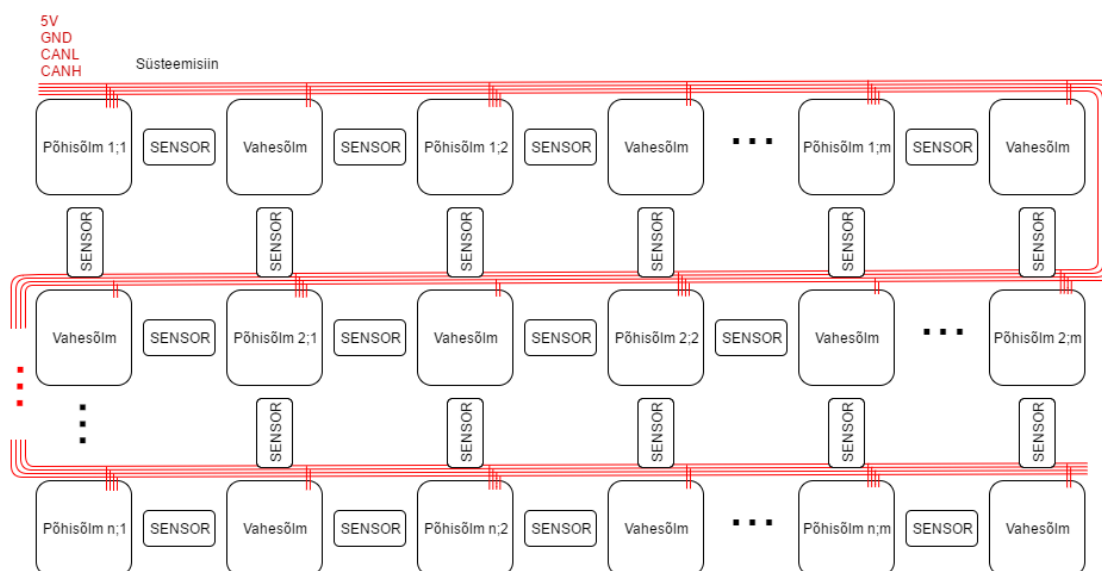
Sensori kuuest juhtivast kihist nelja välimist kasutatakse painderadiuse mõõtmiseks. Neli kihti on ühendatud selliselt, et moodustavad Wheatstone mõõtesilla nagu näidatud joonisel 1, vasakul. Kui sensorit painutada, pikenevad sensori kumeruse poolseid kihti ning nende kihtide ristlõikepindala väheneb. Vastupidiselt muutuvad sensori nõgususe poolseid kihti lühemaks ja ristlõikepindala suureneb. Pikenenud ja õhenenud kihtide takistus suureneb, sest vool peab läbima pikema, väiksema ristlõikepindalaga juhi ning lühenenud ja suurenenud ristlõikepindalaga kihtide takistus väheneb. Kui punktide VCC ja GND kontaktide vahele on rakendatud positiivne pinge tekitab takistuse muutus mõõtesillas tasakaalutuse, kus mõõtepunktides (S₂₅ ja S₁₆, Joonis 1) on erinevad potentsiaalid, mis on lineaarses seoses

sensori paindega. Sensori katsetulemused näitavad, et mõõtesilla väljundpinge amplituud on ligikaudu 400 mV sensori +/- 90° painete korral, kui silla toitepinge on 5 V (4).

Kahe sisemise juhtiva kihi vahelist mahtuvust kasutatakse venituse mõõtmiseks. Kui sensorit venitada väheneb kihtide omavaheline kaugus ja suureneb kihtide pindala ning seetõttu suureneb ka nende kihtide vaheline mahtuvus. Selline mahtuvuse mõõtmine on paindest praktiliselt sõltumatu, sest paine mõjutab keskmiste kihtide mõõtmeid, kaasa arvatud vahekauguseid, vähesel määral. Sensori katsetulemused näitavad, et sensori mahtuvus muutub vahemikus 27 pF – 31 pF kuni 45% venituse korral (4). Mahtuvuse leidmiseks mõõdetakse Schmitt trigeritest ja takistist koosneva multivibraatorahela väljundsignaali sagedust.

2.2 Sensorvõrgu funktsionaalsed osad

Kogu sensorvõrgustik koosneb järgnevatest elementidest: süsteemisiin, põhisolmed, vahesolmed ja sensorid. Võrgu põhimõtteskeemi kirjeldab joonis 2.



Joonis 2. Sensorvõrgu Põhimõtteskeem kus kastidega on tähistatud põhisolmed, vahesolmed ja sensorid ning punaste radadena süsteemisiin mis süsteemi kokku ühendab.

Süsteemisiin on disainitud kasutama elastsest materjalist sentimeetri laiust juhtivate soontega paela, mille kiudude vahel jookseb neli vasest juhet, mis kannavad edasi toiterada (+5 V), maad (0 V), CAN siini positiivse polaarsusega signaali (CAN High) ja CAN siini negatiivse polaarsusega signaali (CAN Low) (7). Selle töö raames on testimiseks süsteemisiinina plaatide omavaheliseks ühendamiseks kasutatud elastse paela asemel prototüüpimisjuhtmeid. Süsteemisiin varustab kõiki sõlmi toitepingega ning võimaldab sõlmede vahelist suhtlust ja võrgusuhtluse kuulamist mõne välise CAN siini liiklust lugeva seadmega.

Põhisõlm on keskne üksus, kus asub suurem osa kogu süsteemi elektroonikast. Põhisõlme trükkplaadil on mikrokontroller, mis töötleb mõõtetulemusi, analoog-digitaal muundur sensorite mõõtesildade mõõtmiseks, ahelad sensorite mahtuvuse mõõtmiseks, CAN siini transiiver sõlmede omavaheliseks suhtluseks ja pistikud sõlmede omavaheliseks ühendamiseks. Põhisõlme küljes on kontaktid mõõtesilla tasakaalupunktide, mahtuvuse mõõtmiseks kasutatava sensori kihi ja maaühenduse jaoks.

Vahesõlm on trükkplaat, mille külge ühendub neli sensorit. Vahesõlmel on 3,3 V LDO, mis süsteemisiini 5 V toidab sensorite mõõtesildu. Iga mõõtesilda ühendatud kihiga on jadamisi takisti, mille abil on võimalik riistvaraliselt sensoreid kalibreerida. Testimise eesmärgil saab mõne sensori kihi takistust suurendada. Vahesõlmel on kontaktid mõõtesilla toitepinge ja maaühenduse jaoks. Lisaks mängib vahesõlm ka mehaanilist rolli, sest on sensorite teine kinnituspunkt ja vahelüli võrgus olevate põhisõlmede vahel.

Iga põhisõlme kohta on võrgus neli **sensorit**. Sensori mõlemas otsas on kuus kontakti, mille abil sensorid põhi- ja vahesõlmedega ühenduvad. Selliste sensorite oluline omapära on, et nende painet ja venitust on võimalik mõõta samaaegselt.

3 Nõuded

Süsteemile esitatavad põhilised nõuded on tingitud peamiselt sensori omapäradest ning soovist kasutada sensorvõrgustikku võimalikult reaalajaliste mõõtmiste sooritamiseks. Sensorvõrgu suurus ei ole käesoleva disainiga määratud ja võrku võib olla ühendatud mitmeid põhisõlmi. Selleks valiti sõlmede vaheliseks suhtluseks kahte signaalirada nõudev CAN siin (8). Kasutuslihtsuse ja arvutiga ühilduvuse (UART-USB konverterite abil) eesmärkidel on põhisõlmedele lisatud UART liides testimise ja silumise eesmärgil. Sujuva kasutuskogemuse tagamiseks esitatakse tänapäevastele *motion capture* ja animatsioonisüsteemidele nõue vähemalt 60 Hz andmeedastuseks.

3.1 Funktsionaalsed nõuded

Funktsionaalsed nõuded kirjeldavad sensorvõrgu elementidele seatud tööpõhimõttest tulenevaid põhilisi ülesandeid, mida tuleb töö eesmärgi saavutamiseks lahendada.

- Iga põhisõlm peab mõõtma iga sensori mahtuvuslikke kihte ja mõõtesilla mõõtepunkte.
- Iga põhisõlm peab edastama enda poolt mõõdetud väärtuseid CAN siinile.

- Iga põhisoõlm peab olema konfigureeritav UART liidese kaudu.
- Iga põhisoõlm peab olema võimeline käituma haldurina ja edastama UART liidesel välisele kontrolleri (arvutile) kõikide sõlmede mõõdetud tulemusi.
- Iga põhisoõlm peab olema tarkvaraliselt kalibreeritav ja suutma eristada sensori mahtuvusest parasiitmahtuvusi.
- Iga sensorit peab olema võimalik riistvaraliselt kalibreerida. See tähendab, et takistuslikele kihtidele peab olema võimalik jadamisi ühendada takisteid ning mahtuvuse kalibreerimiseks peab olema võimalik ühendada mahtuvusliku kihiga paralleelselt kondensaator.
- Sensorid peavad mõõtesilla toitepinge saama vahesoõlmelt.
- Elektroonikakomponendid tuleb valida selliselt, et eduka disaini puhul oleks võimalik trükkplaatide füüsilisi mõõtmeid oluliselt vähendada kuni sensorite suurusjärguni.

3.2 Mittefunktsionaalsed nõuded

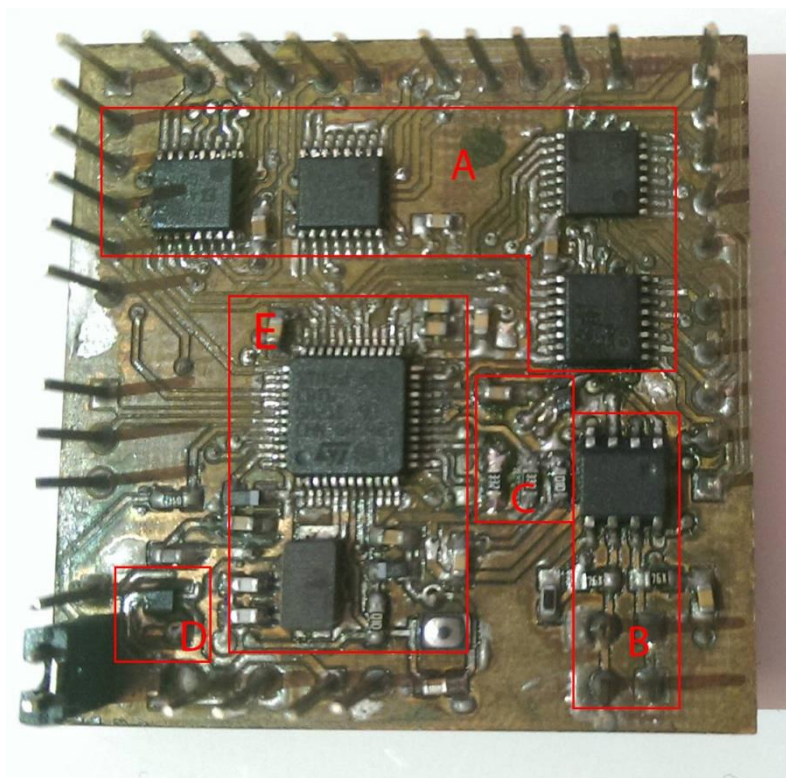
Mittefunktsionaalsed nõuded kirjeldavad viise, kuidas funktsionaalsete nõuetega seatud ülesandeid tuleb lahendada – seatakse ajalised piirangud, mõõtmisvahemikud ja tingimused.

- Iga põhisoõlm peab edastama mõõdetud tulemused CAN siinile vähemalt 60 korda sekundis.
- Iga põhisoõlm peab suutma edastada enda ja teiste sõlmede mõõdetud tulemusi (CAN siinilt) UART liidese kaudu välisele kontrolleri vähemalt 60 korda sekundis.
- Iga põhisoõlm peab suutma mõõta analoogmuunduri diferentsiaalsete kanalite abil pingerinevusi kahe mõõtepunkti vahel vähemalt vahemikus ± 200 mV.
- Iga põhisoõlm peab suutma mõõta mahtuvusi vahemikus kümnetest sadade pikofaraditeni, kusjuures niivõrd oluline ei ole mahtuvuse absoluutväärtus, vaid mahtuvuse suhteline muutus ajas.
- Iga põhisoõlm peab suutma UART liidese kaudu väljastada mõõdetud signaali nii inimloetavalt ja selgitustega kui komaga eraldatud väärtuste formaadis (CSV).

4 Disain

4.1 Esimene prototüüp

Käesoleva töö esimeseks etapiks oli disainida prototüüp. Esimese versiooni eesmärk oli tutvuda probleemiga ja testida alternatiivset lahendust viimases versioonis ehitatud seadmele. Ühtlasi tutvuda projektis kasutatava mikrokontrolleriga ja alustada tarkvara porditava osa, milleks oli mikrokontrolleri UART juhtimisliides ning CAN siinil suhtlemiseks vajalik tarkvara, arendusega. Lihtsust silmas pidades jäi esimese versiooni ulatusest välja sensorite mahtuvusliku elemendi mõõtmine, sest oli olemas sobiv tehniline lahendus mahtuvuse mõõtmiseks mida oli juba varasemalt testitud Tartu Ülikooli sensortalla projektis (9). Prototüübi elektroonika, kaasa arvatud trükkplaat, on disainitud kasutades tarkvara Altium Designer 15.1 (10). Esimese prototüübi elektroonikaskeem on toodud lisas 1.



Joonis 3. Esimese prototüübi trükkplaat. A - analoog multiplekserid sensorikihtide ühendamiseks mikrokontrolleriga, B - CAN transiiver sõlmedevaheliseks suhtluseks, C – vooluallikas, D – toitepinge regulaator, E – mikrokontroller.

Esimese prototüübi tööpõhimõtte seisnes vooluallika abil sensori igal kanalil tekkiva pinge mõõtmises ning seejärel tarkvaraliselt mõõdetud pingete erinevusest paindeinformatsiooni tuletamises. Joonisel 3 on näha esimese versiooni trükkplaati monteeritud komponentidega.

Trükkplaadi servades asuvad viigud toite, sensorite, suhtlus- ja programmeerimisliidese ühendamiseks. Alustades vasakust servas on esimesed kolm viiku mikrokontrolleri BOOT0 viigu väärtuse valimiseks. BOOT0 biti abil määratakse alglaadimise asukoht. Antud kasutuses oli mikrokontrolleri BOOT0 viik ühendatud läbi takisti maaga, ehk BOOT0 väärtus on loogiline null ja mikrokontroller alustab alglaadimist välkmälust. Kui BOOT0 väärtus oleks loogiline üks sõltub alglaadimise asukoht mikrokontrolleri mälus defineeritud bitiga BOOT1. Kui BOOT1 on loogiline üks toimub alglaadimine süsteemimälust, kui BOOT1 on loogiline null käivitatakse kood SRAM-ist. (11)

Järgnevad kolm viiku on UART liidese ühendamiseks ning kuus viiku SWD silumisliidese ühendamiseks. Ülemises ja parempoolses servas on neli viiekontaktist ühendust sensorite ühendamiseks (neli kihti ja maa).

A – neli kaheksa kanaliga TSSOP16 korpuses DG4051A multiplekserit (12). Iga kahe sensori kohta on kaks multiplekserit, millest üks ühendab sensorite mõõtepunkte mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduriga ning teine (mõlemaid multipleksereid adresseeritakse samade signaalidega) ühendab mõõdetava kihi vooluallikaga samasse ahelasse.

B – SOIC pakendis CAN transiiver MCP2561FD sõlmede omavaheliseks suhtluseks (13).

C – Markeeritud kasti ülemises paremal nurgas on näha väga väikest SOT1215 pakendis PMOS transistori PMXB65UPE, mis koos STM32F302CBT6-te integreeritud operatsioonivõimendi ning väliste takistite abiga moodustavad vooluallika väljundiga 330 μ A (14) (11). Väike pakk valiti, et testida kui hästi on võimalik sellist komponenti käsitsi, eriti freesitud trükkplaadile, joota. Kuigi Tartu Ülikooli protokeskuse trükkplaadifreesi LPKF Protomat S43 tolerantside tõttu ei ole võimalik komponendi jalajälge korrektselt joonistada, õnnestus komponent siiski plaadile joota ning sellest võib järeldada, et probleeme ei teki ka tööstuslikult toodetud trükkplaadile jootmisega (15).

D – *Thin* MLF pakendis 3.3V, 150mA LDO MIC5302, mis varustab sõlme toitepingega (16).

E - ARM-CortexM4 32-bitiline LQFP48 pakis mikrokontroller STM32F302CBT6 ning selle juurde kuuluvad kristall, passiivkomponendid ja taaskäivitamise lüliti (11). Mikrokontrolleri peamised ülesanded sellel plaadil on multiplekserite adresseerimine, pinge mõõtmine sensori kihtidelt, vooluallika käivitamine ja suhtlemine UART ja CAN liidestel.

Esimese prototüübi käivitumisel seadistatakse UART liides arvutiga suhtlemiseks. Seejärel seadistatakse ADC mõõtma pinget määratud analoogviigul, mis multiplexerite abiga ühendatakse mõõdetavate kanalitega. Analoogmuundur on seadistatud pidevalt mõõtma ning iga mõõtmise järel adresseeritakse järgmine multiplexeri kanal ja mõõdetakse pinge järgmisel kihil. Teiseks häälestatakse mikrokontrolleri sisene operatsioonivõimendi, mis kontrollib vooluallika transistori väratit vastavalt tagasisidele transistori väljundist.

	Sensori kanalid (Ω)				Mõõdetud pinged (V)				Arvutatud voolud (μA)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Sensor 1	1800	10000	1800	10000	0,1	0,39	0,1	0,39	55,56	39	55,56	39
Sensor 2	2700	3300	3900	6800	0,14	0,17	0,19	0,3	51,85	51,52	48,72	44,12
Sensor 3	8200	6800	3900	2700	0,34	0,3	0,19	0,14	41,46	44,12	48,72	51,85
Sensor 4	2200	3300	4700	5600	0,12	0,17	0,22	0,26	54,55	51,52	46,81	46,43

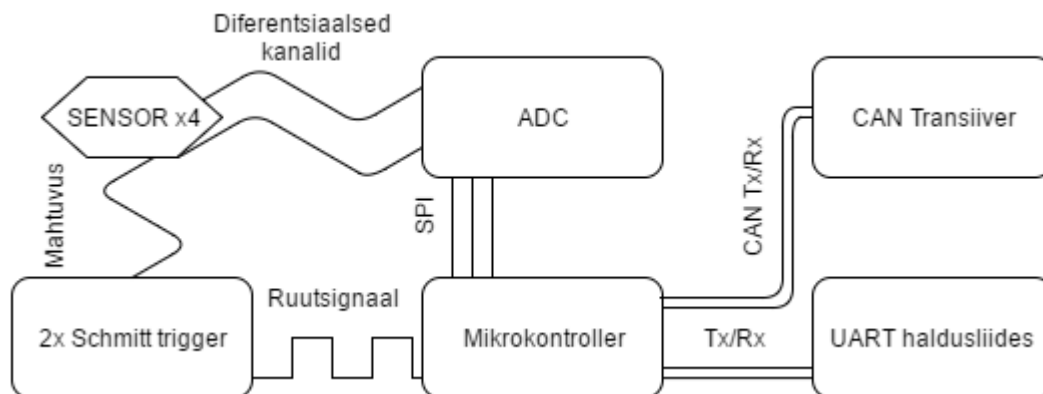
Tabel 1. Prototüübi mõõtetulemused

Esimese prototüübi tulemused ei olnud ootuspärased. Sagedased probleemid esinesid vooluallika kontrollimisel, ühtlasi ei olnud vooluallikas ei täpne ega lineaarne. Esialgselt disainiti vooluallikas selliselt, et väljundvool oleks $330 \mu A$. Vooluallikas on disainitud näite järgi raamatust „The Art of Electronics“ (17). Sellisel kujul vooluallikas ei töötanud ootuspärastelt ning väljundvool kõikus vahemikus $200 \mu A$ kuni $1 mA$ vastavalt koormusele. Täiendaval uurimisel, vahetades vooluallika ahelas takisti $R7$ 330Ω asemel 3300Ω takisti vastu muutus vooluallikas stabiilsemaks kuid vaid sellepärast, et kümme korda suurema takisti suhtes ei mänginud koormuste simuleerimiseks lisatud takistid voolutarbe osas protsentuaalselt nii suurt rolli kui enne. See võib jätta mulje, et vooluallikas töötab stabiilsemalt, kuid tegelikult see nii ei ole. Tabelist 1 on näha mõõtmistulemused kui $R7 = 3300 \Omega$. Tabeli vasakus tulbas on ära toodud takistuste väärtused, millega sensori kihte imiteeriti, keskmises tulbas on vastavad mõõdetud pinged nendel takistitel ning paremas tulbas takistusest ja pingest arvutatud voolud. Voolude tabelist on siiski näha olulist kõikumist amplituudiga kuni $16,56 \mu A$, mis kinnitab, et tegu ei ole siiski töötava, koormusest sõltumatu vooluallikaga ja ei sobi antud mõõtmisrakendusse.

Prototüübi eesmärk oli testida elektroonikaliselt lihtsamat lahendust, ohverdades osaliselt täpsuse ja leppides rohkemate komponentidega, mis tulevikus minimaliseerimist võivad takistada. Olles mõõtmistulemustest veendunud, et selline lahendus ootustele ei vasta, ei ole oluliselt kiiremini ja lihtsamini teostatav, vajab täiendavat uurimustööd ja väga täpset disaini

otsustati antud lahenduse arendus lõpetada. Kuna esimene versioon ei osutunud sobivaks ning seda disaini ei olnud plaanis rohkem toota ei arendatud selle plaadi raames CAN liidest.

4.2 Lõppversiooni elektroonika



Joonis 4. Lõppversiooni elektroonika plokkskeem, kus kastidega on märgitud põhisõlme peamised komponendid ning nende vahelised ühendused koos ühenduse tüübiga.

Nii põhisõlm kui vahesõlm disainiti selliselt, et hiljem oleks võimalik elektroonika disaini oluliselt muutmata vähendada trükkplaatide füüsilisi mõõtmeid. Põhisõlm koosneb neljast peamisest komponendist, mis on valitud selliselt, et oleksid sobilikud sellele rakendusele ja saadaval võimalikult väikese pindalaga korpustes. Joonis 4 illustreerib põhisõlme elektroonika tööpõhimõtet. Keskseks komponendiks on mikrokontroller, mis suhtleb üle SPI liidese analoog-digitaal muunduriga, mis mõõdab neljal diferentsiaalsel kanalil pinget sensori kihtidel. Veel mõõdab mikrokontroller Schmitt triggeritest ruutsignaali sagedust ja suhtleb teiste põhisõlmedega CAN siini kaudu ning ühendub UART liidese kaudu väliste kontrolleritega.

4.2.1 Komponentide kirjeldus ja valiku põhimõtted

Lõppversiooni elektroonikas põhi- ja vahesõlmes kasutusel olevate komponentide nimekirjad on leitavad vastavalt lisadest 6 ja 7.

Mikrokontroller – Põhisõlme toimimist juhib 32-bitiline LQFP48 pakendis ARM Cortex-M4 mikrokontroller STM32F302CBT6, millel on 128 KB välkmälu ja 32 KB muutmälu (11). Kuna sõlmede omavaheline suhtlus toimub CAN liidese abil oli esimene põhiline tingimus mikrokontrolleri valikul selle liidese olemasolu. Teine oluline aspekt oli piisav võimekus nõuetest tuleneva andmemahu töötlemiseks. Selle seeria mikrokontrolleritel on riistvaraline tugi ujukomaarvutusteks ja DMA tugi UART, CAN, SPI ja taimerite liidestel. Alternatiivina praegu kasutuses olevale 48 kontaktiga pakile on tootja valikus ka 49 kontaktiga WLCSP

korpuses STM32F302K8U6, mis on tarkvaraliselt ühilduv (erinevad vaid mälumahud ja erinevate liideste arv ja olemasolu) ning suurusega vaid 3,417 mm x 3,151 mm on paki pindala trükkplaadil vaid 10,767 mm² (18). Lisaks CAN-le on valitud mikrokontrolleril ka kõik teised eelpool nimetatud ja nõuetest tulenevad liidesed ning riistvaraline tugi väliste signaalide sageduse mõõtmiseks taimeri abil. Oluline on ka mainida, et tootja valiku puhul mängis väga tugevat rolli fakt, et STMicroelectronicsi mikrokontrollerid on tänu Discovery arendusplaatidele, millel on välja toodud SWD liides, kergesti programmeeritavad ja silutavad, ilma et nõuaksid suurt kulutust välise tööriista (näiteks Segger JTAG) soetamiseks. Lisaks lihtsustab ST32F302CBT6 puhul arendust ka asjaolu, et sama seeria mikrokontroller on kasutusel ka F3-Discovery arendusplaadil ja seda mikrokontrollerit kasutab väga suur kogukond arendajaid. Ühtlasi on sellele kontrollerile ka palju näiteid erinevate funktsioonide ja riistvaraliste liideste kasutamisest (11) (19).

ADC – Sensori painde mõõtmiseks kasutatakse analoog-digitaal muundurit. Sensorvõrgu sõlmedes on selleks valitud Analog Devices AD7193 24-bitilise resolutsiooni, programmeeritava võimendusteguri ja nelja diferentsiaalse kanaliga TSSOP16 korpuses sigma-delta muundur, mis suudab mõõta kuni 4.8 kHz sagedusega (20). Seda komponenti on võimalik saada ka 5 mm x 5 mm pindalaga LFCSP32 pakis. Analoog-digitaal muunduri valikul oli oluline valida piisavalt suure resolutsiooniga seade, millel oleks vähemalt neli diferentsiaalset kanalit, mis oleks lihtsasti juhitav ning tarkvara arendamise lihtsustamiseks oleks tootja poolt saadaval ka põhjalik dokumentatsioon. Selles töös kasutatava mõõtmisrakenduse jaoks on 24-bitiline resolutsioon küll ebavajalikult kõrge, kuid võimaldab testimise eesmärgil täpsemalt mõõta sensoritelt tulevaid signaale. Konkreetse ADC puhul on võimalik valida mitme erineva digitaalse filtri vahel, kaasa arvatud riistvaraline keskmistamine.

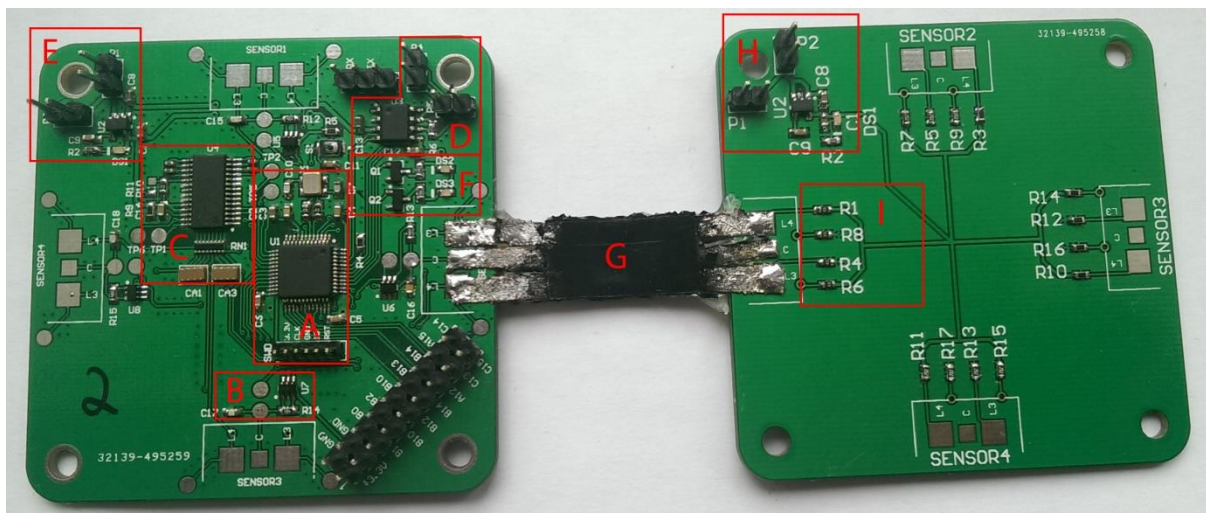
Schmitt trigger – Mahtuvuse mõõtmiseks kasutatakse Schmitt triggerist ja takistist koosnevat multivibraatorit. Võttes eeskujuks Tartu Ülikooli sensortalla projekti osutus sarnaselt sellele valituks SOT363 pakendis Nexperia 74AUP2G14 kahe inverteeriva Schmitt triggeriga puhver. Kuna tegemist on võrdlemisi lihtsa komponendiga oli valiku puhul olulisemateks faktoriteks sobiv toitepinge vahemik ja paki suurus. Alternatiivina on võimalik valida see komponent 1 mm x 1,45 mm XSON6 pakis (21). Vältimaks mahtuvussignaali vedamist pikkade radadega ja selle tõttu parasiitmahtuvuste ning müra suurenemist süsteemis valiti ühe rohkemate triggeritega paki asemel variant, kus on 2 inverteerivat Schmitt triggeriga puhvrit ja need paigutati iga sensori signaali kontaktile võimalikult lähedale.

CAN transiiver – Teiste sõlmedega suhtlemiseks valitud CAN siini jaoks on tarvis transiiverit, mis teeb mikrokontrolleri poolt pakutavast andmelülikihi signaalidest füüsilise kihi kahepolaarsed signaalid (22). Transiiveriks valiti Microchip MC2562FD, sest see töötab 5 V toitepingega, mis on saadaval süsteemisiinilt, kuid toetab 3,3 V sobilikke I/O signaale, et kontrolleriga suhelda, CAN 2.0B standardit ning on saadaval 3 mm x 3 mm DFN pakendis (13). Selles töös valiti 8 kontaktiga SOIC pakk.

4.2.2 Elektroonika tööpõhimõte ja trükkplaadi disain

Disainitud riistvara lahendust on küll võimalik mahutada oluliselt väiksemale trükkplaadile, kuid riistvara ja tarkvara hilisema vigade silumise lihtsustamiseks kasutatakse suurt, 6 cm x 6 cm trükkplaati. Samal eesmärgil on plaadile lisatud testpunktid oluliste signaalide mõõtmiseks ning kasutusele võetud komponentide pakendid on valitud sellised, et neid oleks lihtne käsitsi joota ja kõik viigud ulatuksid pakendi alt välja. Põhisõlme elektroonikaskeem on leitav lisadest 3 ja 4, vahesõlme elektroonikaskeem on leitav lisast 5. Põhi- ja vahesõlme trükkplaatide disainid on toodud lisades 8 ja 9. Põhi- ja vahesõlme elektroonika, kaasa arvatud trükkplaat, on disainitud kasutades tarkvara Altium Designer 15.1 (10).

Nagu peatükis „2.2 Süsteemi komponendid“ kirjeldatud saavad sõlmed 5 V toitepinge süsteemisiinilt. Põhisõlmes kasutatakse nii 5 V toitepinget kui ka 3,3 V toitepinget. Süsteemisiinilt tuleva 5 V pingega töötab CAN transiiver, ülejäänud komponentide jaoks on kasutusel 3,3 V pinge. Pinge madaldamiseks on kasutusel Microchipi LDO TC1015 (23). Vahesõlmedel on sensorite mõõtesilla toitmiseks kasutusel vaid 3,3 V, mis saadakse süsteemisiini pingest sama LDO kasutades.



Joonis 5. Põhisõlme (vasakul) ja vahesõlme (paremal) trükkplaadid sensoriga. A – mikrokontroller kristalli, passiivide ja programmeerimisliidesega. B – Schmitt trigger sensori mahtuvuse mõõtmiseks koos passiividega. Selliseid ahelaid on trükkplaadil neli – üks iga sensori kohta. C – ADC pingete mõõtmiseks sensorite mõõtesildades. D – CAN transiiver ja pistikud sõlmedevaheliseks suhtlemiseks. E – Pingeregulaator ja pistikud toitepinge saamiseks süsteemisiinilt. F – Indikaatorledid silumiseks. G – Sensor põhi- ja vahesõlme vahel. H – Pingeregulaator ja pistikud süsteemisiinilt toitepinge saamiseks. I – Sensori painde mõõtmiseks kasutatavate kihtide takistuse kalibreerimiseks mõeldud jadamisi ühendatud takistid.

Jooniselt 5 on näha põhisõlme, sensorit ja vahesõlme. Trükkplaadid on toodetud Hiinas ja tellitud portaali ALLPCB kaudu ettevõttelt HQPCB (24). Komponendid on trükkplaatidele monteeritud käsitsi. Punaste kastide ja tähtedega on markeeritud mõlema plaadi olulisemad osad.

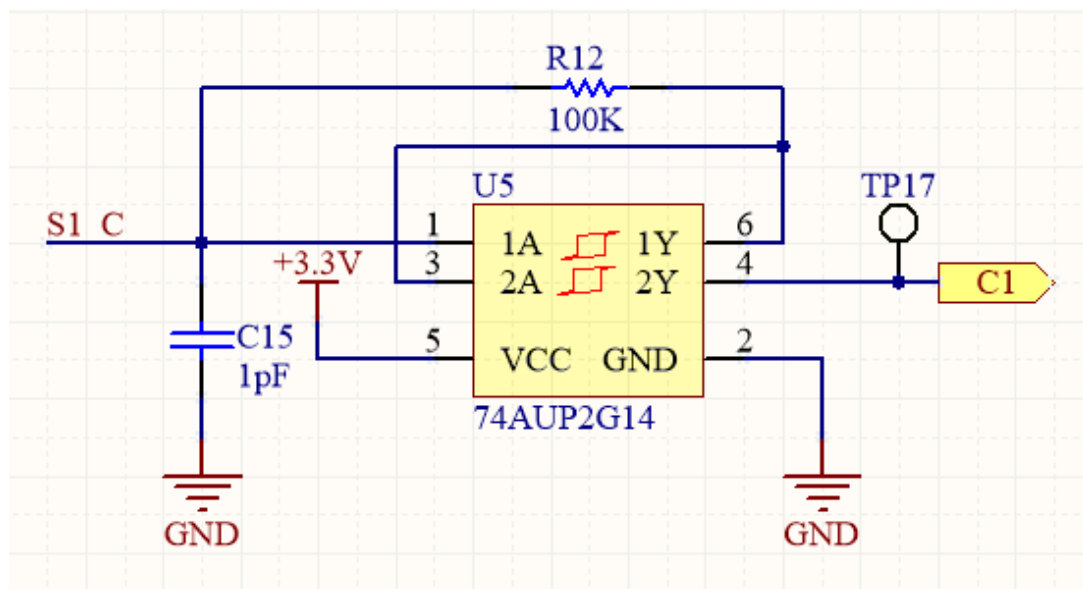
Kastis A on eelmises alapeatükis mainitud mikrokontroller koos lahtisidestuskondensaatorite, kuuekontaktilise ühenduse SWD liidese jaoks ning 16 MHz kristalli ja passiivkomponentidega. Mikrokontroller tekitab välisest kristallist oma töösageduse 72 MHz.

Kastis B on iga sensori mahtuvuse mõõtmiseks kahest Schmitt triggerist, kondensaatorist ja takistist koosnev ahel, mis vastavalt mahtuvusele tekitab ruutsignaali sagedusega,

$$f = \frac{1}{a \times RC} \quad (1)$$

kus RC on kondensaatori laadimise ajakonstant ja a on Schmitti triggeri toitepingest sõltuv konstant. Kui toitepinge on 3,3 V on a võrdne 1,45-ga (21). Et vältida parasiitmahtuvusi, mis võivad tekkida esimese triggeri väljundi radade vedamisest mikrokontrollerini on takistist R12 ning seega ka sensori elemendist ja kondensaatorist C15 (Joonis 6) lahtisidestuseks lisatud teine Schmitt trigger (9). Sensori elemendiga paralleelne kondensaator C15 on lisatud, et vajadusel kalibreerida sensori mahtuvust sobilikesse piiridesse. Joonisel 6 olevat ahelat testiti

mahtuvuste vahemikus 20 pF kuni 200 pF, mille puhul on väljundsignaali sagedus vahemikus 345 kHz kuni 35 kHz. Seda sagedust on seejärel võimalik mikrokontrolleriga mõõta ning arvutada mahtuvus. Mõõtevahemikku on aga lihtne muuta, kuna takisti R12 väärtusest sõltub väljundsignaali sagedus vastavalt eespool toodud valemile 1. Komponent TP17 on testpunkt, mis hõlbustab elektroonika testimist ning signaali jälgimist näiteks ostsilloskoobi abil.



Joonis 6. Schmitti trigeritega (kollane kast) ahel mahtuvuse mõõtmiseks, S1 C on mahtuvussignaal (antud juhul esimesest) sensorist, C1 on sagedussignaali väljund ja test punkt TP17 on selle mõõtmiseks silumise käigus. Skeemis toodud passiivkomponendid on valitud sobiliku signaali tekitamiseks.

Analoog-digitaal muundur koos passiivkomponentide, ja sisendifiltriga on markeeritud kastis C. (Joonis 5) Sisendfilter koosneb 100 Ω takistist, mis on iga sisendiga jadas, 0,1 μF kondensaator analoog sisendite vahel ja 0,01 μF kondensaator igast analoogsisendist maha. Filtri eesmärk on tõrjuda müra mis tekib ADC modulaatori diskreetimissagedusest (20). Elektroonikaskeem ADC ja sensorite ühendusest on leitav lisas 4. ADC mõõdab neljal diferentsiaalsel kanalil pinget ning tagastab 24-bitilise väärtuse millest on võimalik seejärel mikrokontrolleri abil arvutada pingearv sensorite kahe mõõtepunkti vahel. Mikrokontroller suhtleb ADC-ga üle SPI liidese.

Kastis D (Joonis 5) on markeeritud CAN transiiver ja kaks paari kaheklemmilisi kontakte plaatide omavaheliseks suhtluseks. Lahenduses, kus kasutusel on venivast materjalist süsteemisiin piisab vaid ühest paarist kontaktidest. Teine paar on testimisel süsteemi lihtsustamiseks, et oleks võimalik plaate omavahel ühendada ka kaablite või prototüüpimisjuhtmete abil.

Kastis E (Joonis 5) on markeeritud 3,3 V LDO ja kaks paari kahekontaktilisi klemme süsteemisiinilt toitepinge saamiseks. Sarnaselt CAN plokile on reaalse süsteemisiini puhul tarvilik ainult üks paar klemme.

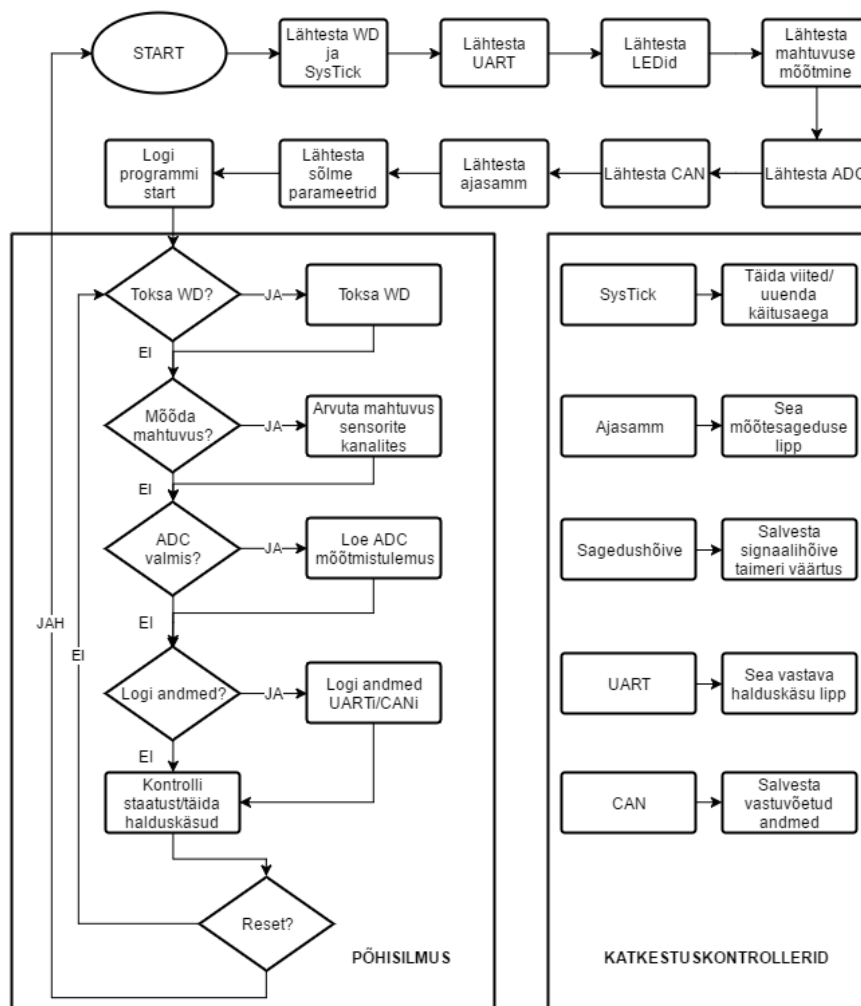
Kastis F (Joonis 5) on kaks LEDi ja kaks transistori nende juhtimiseks, mida kasutaja oma äranägemise järgi saab silumise ja testimise hõlbustamiseks kasutada. Alumine kahest LEDist on selle töö raames seatud vilkuma kord sekundis ning visualiseerib tarkvara korrektset töötamist (*heartbeat*). Ülemine LED on määratud vilkuma, kui CAN siinil toimub saatmine, halduri puhul vilgub ülemine LED CAN siinilt andmete eduka vastuvõtmise korral. Suure andmevahetusageduse tõttu võib tunduda, et ülemine LED põleb stabiilselt.

Tähtede G ja I-ga on markeeritud vastavalt sensor ning sensori takistuslike kihtidega jadamisi olevad kalibreerimiseks mõeldud takistid.

Kastis H on sarnaselt põhisolmele ka vahesõlmel 3,3V LDO, mille väljundpinget kasutatakse sensorite mõõtesildade toitmiseks.

4.3 Tarkvara

Tarkvara arendamiseks kasutati peamise töövahendina Atollic TrueSTUDIO for ARM v 7.1.1 arenduskeskkonda, sest on saadaval tasuta, piiranguteta, võimaldab projekti kiiret ülesseadmist, toetab enimlevinud silumistööriistu ja mikrokontrollereid, sisaldab multifunktsionaalseid silumisvahendeid (*breakpointid*, mälu sisu sirvimine, registrite kirjeldused jpm) (25). Nimetatud tööriistade abil on võimalik efektiivselt ja kiirelt leida tarkvaras vigu ja programmi tööd optimeerida. TrueSTUDIO põhineb populaarsel Eclipse arenduskeskkonnal ja on seetõttu mugav ja tuttav kasutada. Paljud teised tööriistad nagu näiteks IAR Embedded Workbench on saadaval vaid kuu ajalise prooviversioonina või tähtajatu tasuta versioonina mis seab (IAR puhul 32 kB) piirangu kompileeritud koodi mahule (26). Versioonihalduseks on kasutusel GitLab repositoorium ja SourceTree tarkvara selle haldamiseks (27) (28). Tarkvara on kirjutatud C programmeerimiskeeles. Lähtekood on esitatud koos tööga pakitud konteineri näol failis *lahtekood.zip*.



Joonis 7. Tarkvara tööd kirjeldav plokk skeem. Tarkvara käivitumisel lähtestatakse kõik liidesed ja seadmed ning seejärel logitakse haldusliidese kaudu programmi start ja käivitatakse põhisilmus. Põhisilmuse jooksul sooritab mikrokontroller mõõtmisi suhtleb haldusliidese kaudu ning logib mõõdetud tulemused vastavalt CAN või UART liidesesse. Mikrokontrolleri katkestuskontrollerite tööd kirjeldavad joonise paremas tulpas esile toodud tegevused.

Tarkvara tööd kirjeldav plokk skeem on välja toodud joonisel 7. Mikrokontrolleri käivitumisel alustatakse kõikide sisendite, väljundite ja riistvara lähtestamisega. Esimese sammuna seadistatakse valvetaimer 250 ms intervalliks, et programmi vea või peatumise korral mikrokontroller taaskäivitataks. Järgmise sammudena seadistatakse UART haldusliides boodikiirusega 460800 bitti sekundis. Ebastandardne kiirus on valitud, et üle lihtsa liidese, nagu seda on jadaliides oleks võimalik logida maksimaalselt paljude sõlmede mõõdetud andmeid. UART on põhisõlmedes kasutusel testimiseks, arendamiseks ja silumiseks. Lõppdisainis on kõikide sõlmede andmed kättesaadavad süsteemisiinilt välise mõõtetulemusi töötleva kontrolleriga, mis ei ole selle töö osa. Iga sõlm mõõdab nelja mahtuvuslikku kanalit ning esitab mõõdetud mahtuvused femtofaradites 32-bitilise arvuna, et lihtsustada loetavust ja andmetöötlust. Painet mõõtvate kanalite väljund mikrokontrollerist on samuti 32-bitilise

ujukomaarvuna ning seega koos sõlme numbrilise ID-ga (8 bitti) ning ajahetkega mõõtmise algusest (32 bitti) on ühe sõlme paketi suuruseks 37 baiti andmeid. Mõõtmistulemuste jälgimiseks on kasutusel väljund inimloetaval kujul, kus arvud on esitatud ASCII sümbolitena. Sellisel juhul on paketi suurus oluliselt suurem kui eelnimetatud 37 baiti ja võib ulatuda kuni mahuni 75 baiti, mispuhul on maksimaalne teoreetiline läbilase 12 paketti (ehk andmeid 12 kesksõlmelt) 60 korda sekundis. Maksimaalse teoreetilise läbilaske binaarsel kujul paketti/sekundis saame alltoodud arvutuse teel (valem 2). Reaalset andmeedastuskiirust piirab ka tarkvaraline lahendus – kui näiteks UARTile andmete saatmiseks on kasutatud katkestuskontrollereid ja DMA-d on võimalik teoreetilisele läbilaskele oluliselt lähemale jõuda võrreldes olukorraga, kus iga saatmise aspektiga peab tegelema mikrokontroller tarkvaraliselt.

$$\text{läbilase} = \frac{460800\text{bps}}{8\text{bit} \times 37\text{byte} \times 60\text{Hz}} = 25.95 \text{ paketti/sekundis} \quad (2)$$

Testimise ja arendamise eesmärgil piisab kiirustest 25 (inimloetaval kujul 12) paketti sekundis. Mikrokontrolleri ja arvuti vaheliseks suhtluseks on tarvis UART-USB konverterit, mis võimaldab vähemalt 460800 boodikiirust ning jadaliidesega suhtlemiseks terminaliprogrammi arvutisse, näiteks Putty. (29)

Järgmiseks oluliseks sammuks programmi töös on andmehõive lähtestamine. Selleks lähtestame mikrokontrolleri taimeri sisendihõive (*input capture*) režiimis mahtuvuse mõõtmiseks ning ADC neli kanalit pingediferentsiaali mõõtmiseks. Kuna sensori mahtuvusest genereeritava signaali sagedus on võrdlemisi suur, ulatudes ligikaudu 250 kHz, toimub sageduse mõõtmine iga kaheksanda tõusva serva pealt. Selliselt on iga kahe mõõtmiseks vajaliku katkestuse vahe 32 mikrosekundit 4 mikrosekundi asemel ja mikrokontrolleril katkestuse täitmiseks kaheksa korda rohkem aega. Tarkvara optimeerimiseks ja selleks, et kontroller pidevalt katkestustega hõivatud ei oleks, käivitatakse sageduse mõõtmine vaid enne andmete saatmist, mis tähendab vähemalt 60 korda sekundis. ADC on seadistatud pidevalt mõõtma neljal diferentsiaalsel kanalil kahepolaarses režiimis. Sisendfiltriks on valitud sinc^4 tüüpi filter, mõõtesagedus on määratud selliselt, et iga nelja diferentsiaalset kanalit jõuaks mõõta vähemalt 60 korda sekundis (20). Järgmiseks lähtestatakse CAN liides andmete saatmiseks ja vastuvõtmiseks (protokoll on kirjeldatud alapeatükis 4.3.1). Testimisel ja tarkvara arendusel prooviti ka 120 Hz mõõtesagedust, mis samuti töötas. Teoreetiliselt on võimalik mõõtmisi sooritada ka suurematel sagedusel kuid praeguses lahenduses jääb

pudelikaelaks silumiseks mõeldud UART liidese kiirus. Järgnevalt lähtestatakse sõlme staatuse andmestruktuur, mis koosneb erinevatest staatuslippudest ja muutujatest (joonis 8) ning logitakse haldusliidese kaudu seadistuse lõpp ja põhisilmuse start.

```
typedef struct {
    uint32_t node_id;           //Numbriline ID
    uint32_t m_start;           //mõõtmise algusaeg süsteemi käitusajast
    bool is_master;             //Kui tõene, siis on sõlm halduri rollis
    bool adc_available;         //Kui tõene, siis suhtlus ADC-ga töötab
    bool log_data_hr;           //Kui tõene, siis logitakse andmed inimloetavalt
    bool log_status;            //Kui tõene, siis logitakse ühekordselt selle structi sisu
    bool log_adc;               //Kui tõene, siis logitakse ADC registrite sisu
    bool do_measurement;        //Kui tõene, siis sooritatakse mõõtmine
    bool second_passed;         //Kui tõene, siis on programmi käitamisest möödunud täissekund
    bool csv;                   //Kui tõene, siis logitakse mõõtmistulemused csv formaadis
    bool reset;                 //Kui tõene, tehakse ADC-le ja mikrokontrollerile reset
    bool pause;                 //Kui tõene, siis peatatakse programmi töö, funktsioon ei ole kasutusel

    uint16_t ic_ps;             //Sageduse mõõtmise sekundis, kõik sensorid
    uint16_t adc1_ps;           //ADC mõõtmise sekundis, sensor 1
    uint16_t adc2_ps;           //ADC mõõtmise sekundis, sensor 2
    uint16_t adc3_ps;           //ADC mõõtmise sekundis, sensor 3
    uint16_t adc4_ps;           //ADC mõõtmise sekundis, sensor 4
} node_status_t;
```

Joonis 8. Väljavõte põhisõlme lähtekoodist. Mikrokontrolleri tarkvaras kasutatud staatuslippude kirjeldus.

Iga põhisilmuse alguses laetakse uuesti valvetaimeri väärtus, et vältida taaskäivitust. Seejärel vastavalt sõlme staatuslippudele käivitatakse mahtuvuse mõõtmise järjestus, loetakse ADC mõõtmistulemus, kui see on saadaval. Logitakse mõõdetud andmed haldusliidesesse, kui sõlm on seatud halduriks, või CAN siinile, kui vastav ajasamm on möödunud ning kontrollitakse staatuslippe ja täidetakse haldusliidese kaudu saabunud käsud. Joonisel 7 on välja toodud kasutusel olevad katkestuskontrollerid ning tegevus mis nende käivitumisel sooritatakse.

4.3.1 Suhtlusprotokollid

Haldusliidesega suhtlemiseks on kasutusel lihtne ühebaidistest käskudest koosnev protokoll, mis on leitav tabelist 2. Tabelisse mittekuuluva baidi vastuvõtmisel seda ignoreeritakse, tabelisse kuuluva baidi vastuvõtmisel seatakse vastav staatuslipp mille järgi järgmisel põhisilmuse läbimisel kohane käsk täidetakse.

Käsk	ASCII	Käsu nimi	Käsu kirjeldus
0x73	s	CMD_UART_SHOW_DATA	Väljastab haldusliidese kaudu inimloetavalt viimased mõõdetud andmed koos kirjeldusega
0x6D	m	CMD_UART_MASTER	Seab sõlme halduriks
0x6E	n	CMD_UART_LOG_NODE_STATUS	Väljastab haldusliidese kaudu sõlme staatusmuutujate väärtuse koos kirjeldusega
0x61	a	CMD_UART_LOG_ADC_REGISTERS	Väljastab haldusliidese kaudu ADC registreite sisu.
0x72	r	CMD_UART_RESET	Taaskäivitab ADC suhtlusliidese ning sunnib valvetaimerit tarkvara taaskäivitama
0x5A	c	CMD_UART_CSV_ACTIVE	Aktiveerib mõõtmistulemuste logimise UARTi või CANi
0x70	p	CMD_UART_PAUSE	Peatab sõlme töö ilma taaskäivituse, haldusliides jääb aktiivseks. Ei ole tarkvara viimases versioonis kasutusel

Tabel 2. Haldusliidese käsuprotokoll. Kirjeldatud on UART liidese kaudu mikrokontrollerile saadetavad käsud programmi töö kontrollimiseks.

CAN (*Controller Area Network*) ehk kontrollervõrk on jadasiinvõrk, mille abil on võimalik omavahel ühendada teoreetiliselt lõpmatult palju seadmeid. Praktiliselt määravad maksimaalse seadmete arvu ajastustegurid, elektrilised koormused ja nendest sõltuv andmete terviklus. Kõik CAN siini seadmed suudavad töötada iseseisvalt, see tähendab, et ei vaja andmete saatmiseks ega vastuvõtmiseks kontrollerseadet. (30) (8)

Mõõtmistulemuste edastamiseks liidestuvad kõik põhisõlmed CAN siiniga. Kasutusel olev mikrokontroller toetab ja kasutab standardit „CAN 2.0B Active“ (8) (11). Üks terviklik mõõtetulemuste kogumik koosneb kaheksast neljabaidilisest arvust, mis kirjeldavad nelja sensori mahtuvust ja nelja sensori mõõtesilla pingediferentsiaali. Siini standardi järgi ei ole võimalik korraga nii palju andmeid saata – ühte kaadrisse mahub maksimaalselt kaheksa baiti andmeid. Mõõtmistulemuste saatmiseks jagame 37 baidise andmepaketi viieks kaadriks selliselt, et esimese kaadriga saadetakse andmeväljal neljabaidiline täisarv, mis esindab möödunud aega mõõtmise algusest millisekundites, et mõõtmistulemusi sõlmede vahel sünkroniseerida. Järgneva nelja kaadri jooksul saadetakse mõõtmistulemused. Viiest kaadrist koosnevat pakketi kirjeldab tabel 3. Tabelist on sihilikult välja jäetud riistvara poolt lisatavad andmeväljad ja väljade suurused on kirjeldatud tarkvara, mitte CAN standardi füüsilise kihi

vaatepunktist. Andmebaitide illustreerivateks väärtusteks on seatud 0xFF. Kuna kõik seadmed CAN siinil on ühesugused ning siinil liiguvad vaid ühesugused paketid, mida eraldi tuvastada ei ole tarvis on võimalik kaadri identifikaatorit kasutada kaadri prioriteedi tähistamise asemel täiendava andmeväljana, kuhu kodeerida sõlme ID ning kaadri järjekorranumber. Lisaks on tarkvaraliselt kõikide sõlmede CAN kontrollid seadistatud edastama pakette mitte identifikaatori baasil vaid elavjärjekorra baasil. Esimesena saatmiseks esitatud paketid saadetakse esimesena.

Viie kaadrist koosnev pakett	11-bitti			1 bait	1- 8 baiti							
	Kaadri ID (0-4) Sõlme ID (0-n)			Andmebaitide arv (1-8)	Andmebaidid							
	0b000	0000	0010	0x4	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF				
	Kaadri ID (0-4) Sõlme ID (0-n)			Andmebaitide arv (1-8)	Andmebaidid							
	0b001	0000	0010	0x8	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF
	Kaadri ID (0-4) Sõlme ID (0-n)			Andmebaitide arv (1-8)	Andmebaidid							
	0b010	0000	0010	0x8	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF
	Kaadri ID (0-4) Sõlme ID (0-n)			Andmebaitide arv (1-8)	Andmebaidid							
	0b011	0000	0010	0x8	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF
	Kaadri ID (0-4) Sõlme ID (0-n)			Andmebaitide arv (1-8)	Andmebaidid							
	0b100	0000	0010	0x8	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF

Tabel 3. Viie kaadrist koosnev andmepakett mõõtmistulemuste edastamiseks CAN siinil, kus on eraldi välja toodud millistest osadest kaadrid koosnevad. Kaadri identifikaatorisse on kodeeritud kaadri ID (0-4) ja põhisõlme ID. Teise väljana edastatakse saadetavate andmebaitide arv. Esimese kaadri andmeväljal saadetakse paketi mõõtmistulemuste ajatempel, et sõlmede mõõtmistulemusi sünkroniseerida. Ülejäänud nelja kaadriga saadetakse kaheks neljabaidilist arvu mis esindavad nelja sensori mahtuvust ja pinget nelja sensori mõõtesilla mõõtepunktid.

4.4 Edasiarendus ja lõppseade

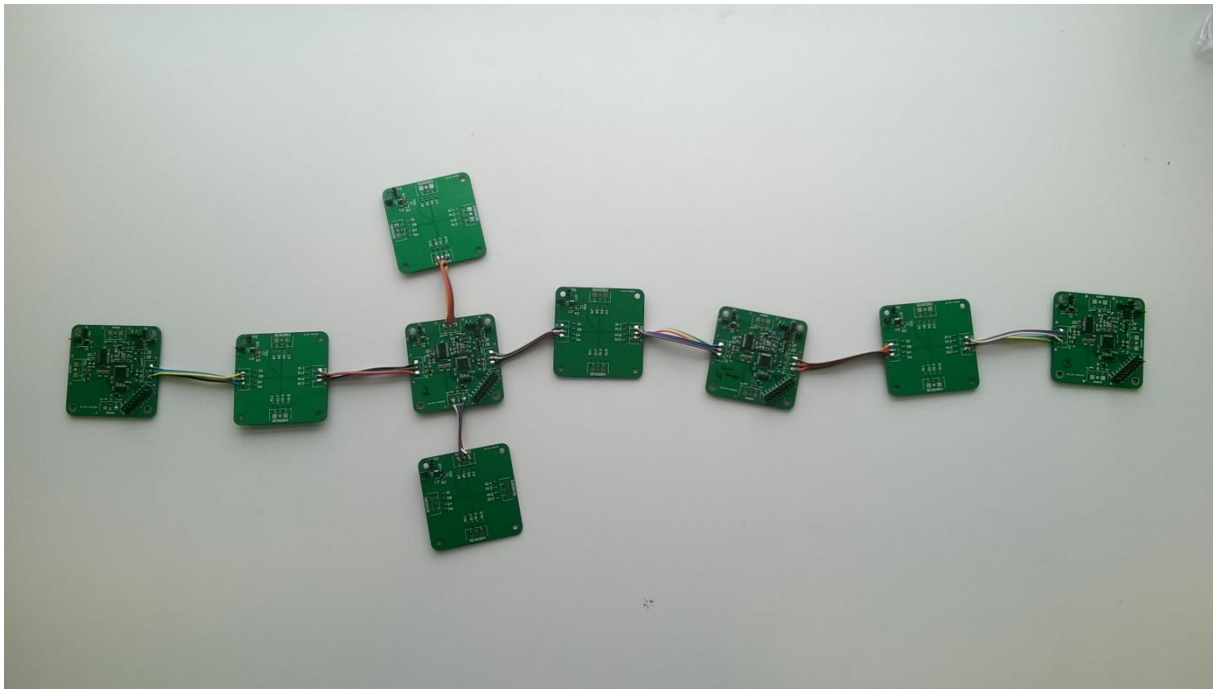
Elektroonika ja tarkvara arendusel jälgiti et eduka disaini korral oleks see rakendatav ka füüsiliselt väiksema elektroonika plaadiga. Selleks valiti komponendid, mida on võimalik tellida väga väikestes pakendites, kus suurima pakendi pindala on vaid 25 mm² (AD7193, LFCSP32 korpuses). Tarkvara on arendatud selliselt, et sama seeria mikrokontrollerite vahel oleks koodi võimalikult lihtne portida. Selleks on riistvaraspetsiifilised muutujad, sisendid ja väljundid ning kontrolleri liidesed defineeritud tarkvaras failis *board.h* mida on võimalik uue mikrokontrolleri jaoks kohandada.

Ülim eesmärk sensorvõrgu eduka, lõpliku disaini suunas oleks disainida juhtelektroonika, mis samamoodi koosneks põhisõlmest ning vahesõlmest, kuid mõlemad trükkplaadid oleks sensoritega samas suurusjärgus (praeguste sensorite puhul, 10 mm x 10 mm) ja toodetud *rigid-to-flex* tehnoloogiaga selliselt, et kontaktid, kuhu sensorid kinnitada oleks trükkplaadi 100 mm² pinnast väljaulatuvad, painduvast trükkplaadist 10 mm laiused ja 5 mm kuni 10 mm pikkused ribad. Sellisel moel on võimalik vähendada oluliselt sensorvõrgus trükkplaatide pindala ja suurendada võrgus sensorite pindala osakaalu, mis tagab suutlikkuse mõõta sensorvõrgu kuju suurema resolutsiooniga. Ühtlasi on *rigid-to-flex* tehnoloogia abil võimalik oluliselt vähendada mehaanilisi pingeid sensori kõige nõrgematele kohtadele – kontakti ja sensori keha üleminekule.

5 Tulemused

5.1 Valmis seade

Käesoleva bakalaureusetöö raames valmisid edukalt põhi- ja vahesõlme elektroonika koos sinna juurde kuuluva tarkvaraga. Sõlmi on võimalik üksteisega ühendada ning võrgustik moodustada. Sobiva tootmisprotsessi arendus kuuekihiliste sensorite valmistamiseks käib praegusel hetkel ning veel ei ole sensorite võrgu testimiseks töökindlat versiooni. Ühe sellise sensori valmistamiseks kulub praegu ligikaudu 8 tundi ning valminud sensorid ja kontaktid on haprad ja ei sobi sellisel kujul juhtseadmega testimiseks. Seetõttu on valmis sensorvõrku imiteeritud vahesõlmedele joodetud takistite ning põhisõlmele joodetud kalibreerimiskondensaatori abil. Süsteemi testimiseks on trükkplaadid omavahel ühendatud sensorite asemel kaablitega, süsteemisiini ühendused on loodud prototüüpimisjuhtmetega. Valminud süsteemi illustreerib joonis 9.



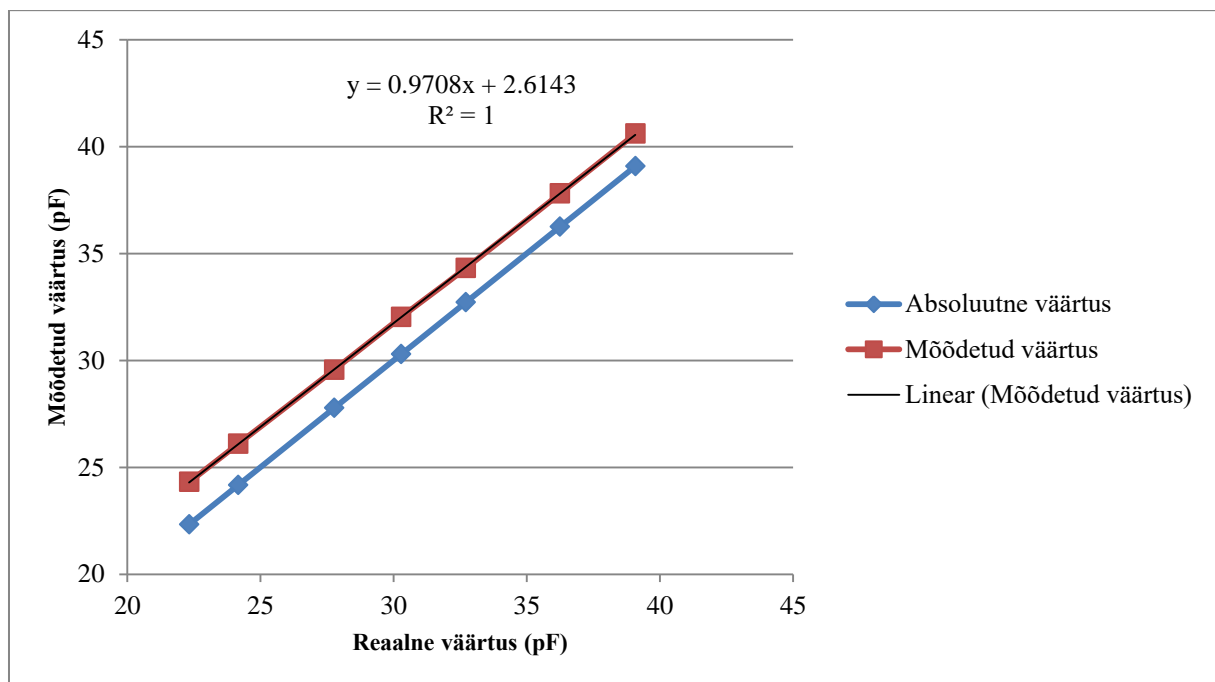
Joonis 9. Töö raames valminud sensorivõrgustik nelja põhisõlme ja viie vahesõlme. Sensorid on asendatud värviliste kaablitega ning sensorite tööpõhimõtet on simuleeritud pinge mõõtmiseks vahesõlmedele joodetud takistitega ning mahtuvust mõõdetakse põhisõlmele joodetud kalibreerimiseks mõeldud kondensaatorilt. Võrgult on pildi selguse huvides ära jäetud toite ja CAN ühendusteks mõeldud prototüüpimisjuhtmed.

5.2 Kalibreerimine

Mahtuvuse mõõtmise kalibreerimine toimub enne, kui plaatidele ühendatakse sensorid. Selles töös on välja toodud kalibreerimisprotsess ühe sensori kohta. Selleks joodeti kalibreerimiseks mõeldud kohale seitse erineva väärtusega kondensaatorit vahemikus 22 pF kuni 40 pF, mille reaalne väärtus mõõdeti LCR täppismõõtjaga Hameg HM8118 (31). Seejärel mõõdeti elektroonikaga kondensaatori väärtust viiel korral ning leitud mõõtmistulemus katsete keskmistamise teel. Mõõtetulemusi illustreerib joonis 10, kus on välja toodud reaalse väärtuse sirge tõusuga 1 ning mõõtmistulemustest koostatud sirge, et visualiseerida nende sirgete paralleelsust. Jooniselt leitud regressioonivõrrandit on võimalik kasutada kalibreerimiskõverana arvutades mõõtmistulemusest selle järgi reaalne mahtuvus. Mõõtmistulemused ja kalibratsioonivõrrandi abil leitud väärtused ning mõõteviga on toodud tabelis 4. Mõõteviga (erinevus kahe sirge vahel) koosneb elektroonikast tekkinud parasiitmahtuvustest ja reaalsest veast mõõtmisel. Maksimaalne viga uuritud piirkonnas enne kalibreerimist oli 8,14% ja vähenes mõõdetava mahtuvuse suurenedes. Kalibreerimisvõrrandi järgi arvutatud tulemuse puhul oli maksimaalne viga 0,18%.

Reaalne väärtus (pF)	Mõõdetud väärtus (pF)	Mõõteviga (pF)	Mõõteviga (%)	Kalibratsioonisirge järgi arvatud väärtus (pF)	Lõppviga (%)
22.329	24.308	1.979	8.14	22.346	0.08
24.167	26.09	1.923	7.37	24.182	0.06
27.768	29.557	1.789	6.05	27.753	0.05
30.288	32.024	1.736	5.42	30.294	0.02
32.712	34.315	1.603	4.67	32.654	0.18
36.247	37.795	1.548	4.1	36.239	0.02
39.080	40.595	1.515	3.73	39.123	0.11

Tabel 4. Mahtuvuse kalibreerimisel leitud väärtused.

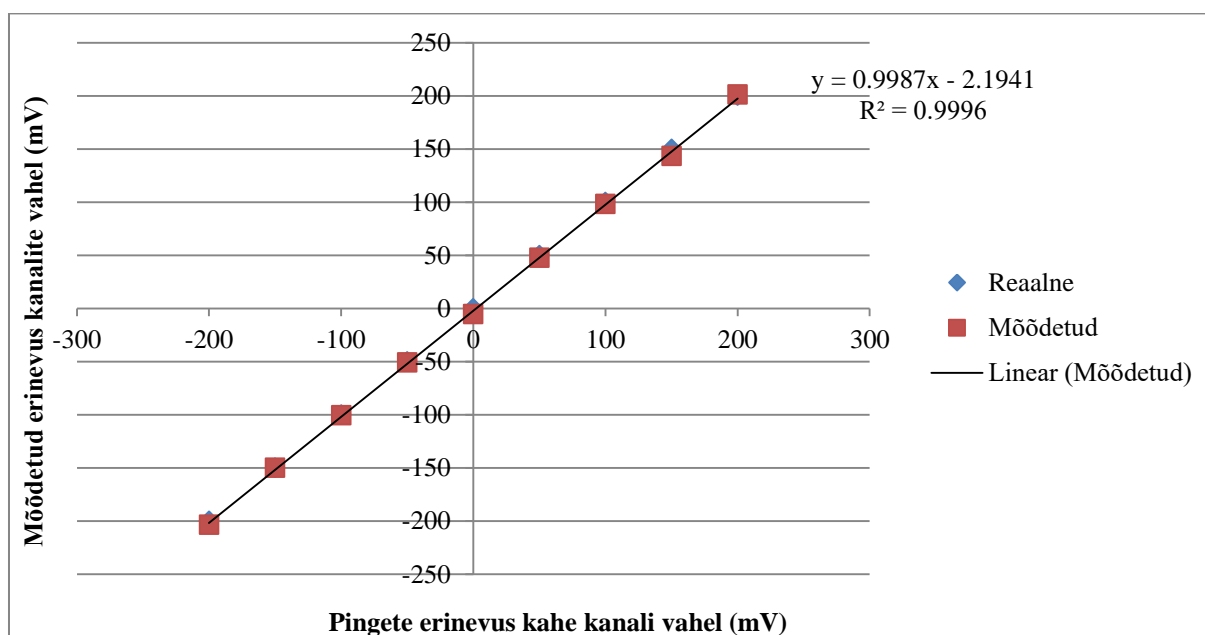


Joonis 10. Kalibratsioonisirge mahtuvuse mõõtmiseks

Analoog-digitaalmuunduri kalibreerimine pingete mõõtmiseks diferentsiaalselt toimub mahtuvuse kalibreerimisega analoogselt. Selleks ühendati sensori mõõtesilla ühte punkti toiteplohist 1,65 V pinget ning muudeti teise mõõtepunkti pinget 50 mV sammudega vahemikus 1,45 V kuni 1,85 V. Registreeriti viis katsetulemust ning leiti lõpptulemus keskmistamise teel ja arvutati mõõteviga. Saadud tulemused on toodud tabelis 5 ning tulemusi illustreerib joonis 11.

Kanal 1 (V)	Kanal 2 (V)	Pingete erinevus (mV)	Mõõdetud erinevus(mV)	Mõõteviga (mV)	Mõõteviga (%)
1.65	1.45	200	201.2818	-1.2818	0.64
1.65	1.5	150	143.5672	6.4328	4.29
1.65	1.55	100	98.3426	1.6574	1.66
1.65	1.6	50	47.5442	2.4558	4.91
1.65	1.65	0	-5.5126	5.5126	N/A
1.65	1.7	-50	-50.9628	0.9628	1.93
1.65	1.75	-100	-100.4622	0.4622	0.46
1.65	1.8	-150	-149.9602	-0.0398	0.03
1.65	1.85	-200	-203.585	3.585	1.79

Tabel 5. Pinge kalibreerimisel leitud väärtused



Joonis 11. Kalibratsioonisirge pinge mõõtmiseks

Tabelist 5 ja jooniselt 11 on näha, et pinge diferentsiaalsete kanalitega pinge mõõtmisel tekkinud viga mahub 5% tolerantsi sisse, kusjuures maksimaalne absoluutne viga on vaid 6,4 mV.

Sensorvõrgu tarkvaraline kalibreerimine töötamise ajal on antud töö skoobist väljas kuid seda on võimalik teha sensorvõrgu edasiarenduses, kus kalibreerimisparameetreid on võimalik sõlmedele edastada CAN siinil.

5.3 Mõõtmistulemused

Mõõdetud tulemused väljastab halduriks seatud sõlm haldusliidesele lihtsasti töödeldavas CSV formaadis. Üks pakett koosneb kümnest väärtusest ja näeb välja nagu näidatud tabelis 6.

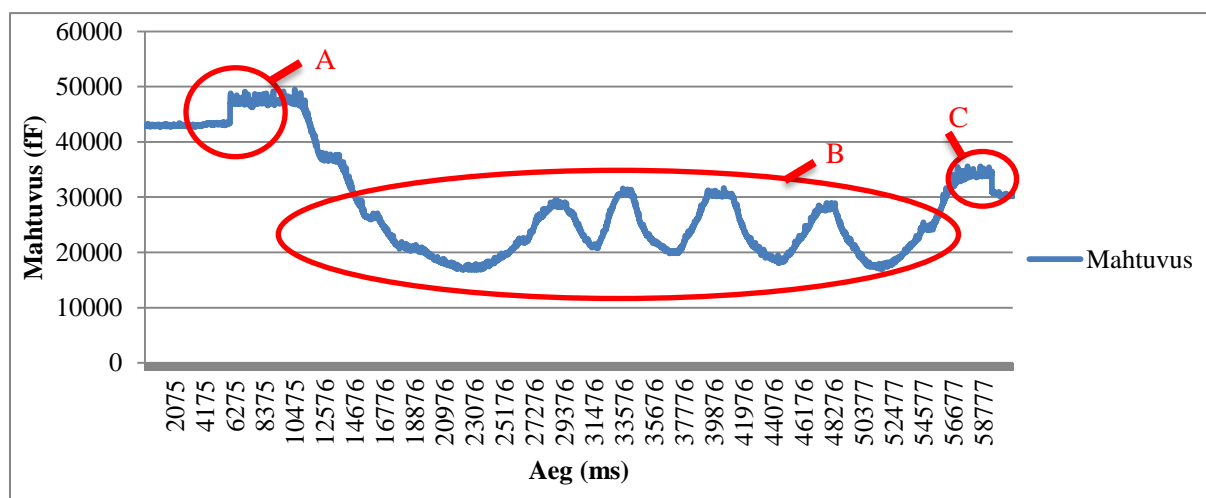
ID	ms	c1	c2	c3	c4	r1	r2	r3	r4
1	1634	28450	27100	27192	29239	100.32	-32.12	-45.2	178.43

Tabel 6. Mõõtmistulemuse pakett haldurilt

Tabel 6 illustreerib mõõtmistulemuste paketti põhisõlmelt. Esimene väärtus märgib numbrilise ID, milliselt sõlmelt võrgust antud mõõtmistulemused pärinevad. Teine numbriline väärtus märgib aja millisekundites mõõtmise algusest sõlmedevaheliste mõõtmistulemuste sünkroniseerimiseks. Järgnevad neli väärtust c1 – c4 märgivad sensorite 1 – 4 mahtuvust femtofaradites, et vältida ujukomaarvuseid ja lihtsustada loetavust ja andmetöötlust. Viimased neli väärtust on pinged millivoltides nelja sensori diferentsiaalsete kanalite vahel. Eelnimetatud mahtuvustest ja pingetest on seejärel võimalik leida sensori paine, painde suund ning venitus (4).

5.3.1 Mahtuvuse muutumine ajas

Ajas muutuva mahtuvuse illustreerimiseks viidi läbi mõõtmistest, kust põhisõlme külge ühendati trimmitava väärtusega kondensaator, mille väärtust muudeti vahemikust ligikaudu 45 pF kuni 15 pF ühe minuti jooksul. Mõõtmistulemust illustreerib joonis 12.

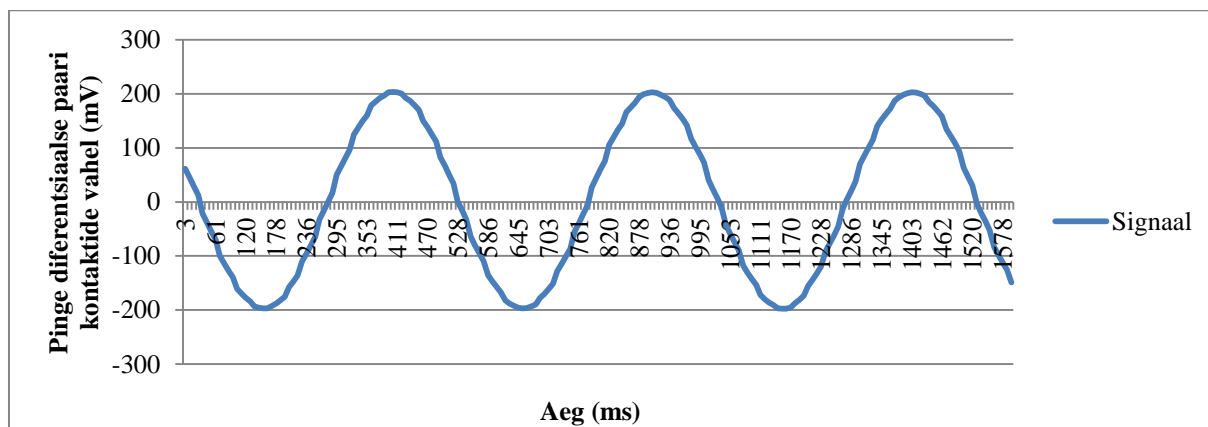


Joonis 12. Mahtuvuse muutumine ajas. Test trimmitava kondensaatoriga. A - Väärtuse mõõtmiseks kruvikeeraja asetamine kondensaatorile, B - Mahtuvuse muutmine uuritavas piirkonnas, C - Kruvikeeraja eemaldamine.

Joonisel 12 on näha mahtuvuse muutust trimmitava kondensaatori väärtust muutes. Markeeringuga A on tähistatud graafikult punkt, kus mahtuvuse oluline hüpe on tingitud trimmitava kondensaatori väärtuse muutmiseks vajaliku kruvikeeraja kontaktist kondensaatoriga. Järgnevalt trimmiti kondensaatori väärtus uuritavasse piirkonda (ligikaudu 20 pF) ning seejärel muudeti kondensaatori mahtuvust keerates terminali edasi-tagasi, et testida loodud elektroonika suutlikkust muutuvat mahtuvust mõõta (markeering B). Jooniselt on näha, et mahtuvuse muutustele reageerimine on piisavalt kiire ning mõõdetud signaal suhteliselt müravaba. Markeeringuga C on tähistatud punkt signaalil, kus mahtuvuse muutmiseks kasutatud kruvikeeraja kondensaatorilt eemaldati.

5.3.2 Pinge muutumine ajas

Analoog-digitaalmuunduri abil mõõdetakse diferentsiaalsete kanalite abil pinget sensori mõõtesilla tasakaalupunktides. Pinge mõõtmise testimiseks ajas muutuva signaaliga sooritati katse, kus ühel ADC kanalil oli fikseeritud pinge 1,65 V ja diferentsiaalse paari teise kanaliga oli ühendatud signaaligeneraatori BK Precision 4054 väljund (32). Signaaligeneraator oli seadistatud tekitama 2 Hz siinussignaali vahemikus 1,45 V kuni 1,85 V. Mõõtmistulemust illustreerib joonis 13, millelt on näha suutlikus kirjeldatud signaali mõõta. Signaal on mõõdetud diskreetimissagedusega 120Hz, vastab oodatud amplituudile 400 mV ja visuaalselt on näha, et signaal on võrdlemisi müravaba.



Joonis 13. ADC-ga mõõdetud pinge signaali muutumine ajas, kui sisendiks on 2 Hz sagedusega ja 400 mV amplituudiga signaal.

6 Kokkuvõte

Selle bakalaureusetöö raames disainiti ja ehitati edukalt prototüüp ja seejärel juhtseade, mille külge on võimalik ühendada korraga kuni neli samaaegselt painet ja venitust mõõtvat sensorit. Selliste juhtseadmete omavahelisel ühendamisel on võimalik moodustada sensorvõrgustik, millega saab mõõta mistahes selle maatriksi poolt ümbritsetud kolmemõõtmelise objekti kuju ning selle muutust. Selles töös kirjeldati süsteemile esitatavaid nõudeid, analüüsiti süsteemi komponente ning nende tehnilist lahendust. Arendati tarkvara ehitatud seadme juhtimiseks ning sooritati mõõtmisi, kalibreerimisi ja teste süsteemi töö hindamiseks. Käesolev töö kirjeldab ka juhtseadme tarkvaralist lahendust ning seadmete ja controllerite vahelisi suhtlusprotokolle. Disainiti süsteemisiin ja valiti suhtlusprotokoll, mille abil sensorvõrgustikku ühendatud seadmed üksteisega suhtlevad.

Sooritatud mõõtmistest selgus, et töö jooksul disainitud seade vastab töös seatud nõuetele: suudab mõõta mahtuvusi vahemikes mõnekümnest mõnesaja pikofaradini, ning pinget amplituudiga 400 mV diferentsiaalsetel kontaktide paaridel.

Töö sisaldab kõikide süsteemi osade detailset ja taastootmiseks vajalikku kirjeldust ja dokumentatsiooni, sealhulgas tarkvara ning valminud juhtseadet on tänu universaalsele disainile võimalik ilma suuremate muutusteta minimaliseerida.

7 Viited

1. **IGN.** A Brief History of Motion-Capture in the Movies. [Võrgumaterjal] 11. Juuli 2014. a. [Tsiteeritud: 8. Mai 2017. a.] <http://www.ign.com/articles/2014/07/11/a-brief-history-of-motion-capture-in-the-movies>.
2. **Bernd Tessenorf, Franz Gravenhorst, Bert Arnrich, Gerhard Troster.** An IMU-based Sensor Network to Continuously Monitor Rowing Technique on the Water. 2011. a.
3. **Woodman, Oliver J.** *An introduction to inertial navigation*. s.l. : University of Cambridge Computer Laboratory, 2007.
4. **Leemets, Kaur, Mäeorg, Uno ja Tamm, Tarmo.** *Development of soft and compliant multimodal deformation sensors*. s.l. : Sensors Actuators A Physical, 252, 42–47, DOI:10.1016, 2016.
5. **Quantum Silicones.** Technical Data Sheet: QM240T. [Võrgumaterjal] 28. August 2012. a. [Tsiteeritud: 8. Mai 2017. a.] <http://www.quantumsilicones.com/wp-content/uploads/2012/07/QM-240T9.pdf>.
6. **Bayer AG.** Baytubes. [Võrgumaterjal] 1. Juuni 2010. a. [Tsiteeritud: 13. Mai 2017. a.] http://www.lidorr.com/_uploads/dbsattachedfiles/baytubesseminartechnicalpresentation2010.pdf.
7. **Amohr.** Conductive Tapes. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. Mai 2017. a.] <http://www.amohr.com/products/conductive-tape/>.
8. **Bosch.** CAN 2.0 Specification. [Võrgumaterjal] September 1991. a. [Tsiteeritud: 17. Mai 2017. a.] http://www.bosch-semiconductors.de/media/ubk_semiconductors/pdf_1/canliteratur/can2spec.pdf.
9. **Pärilin, Karel.** *Digitaalse signaali genereerimine ja mõõtmise mahtuvuslikelt sensoritelt sensortallas*. Tartu : Tartu Ülikool, 2014.
10. **Altium.** Altium Designer. [Võrgumaterjal] 2017. a. [Tsiteeritud: 17. Mai 2017. a.] <http://www.altium.com/altium-designer/overview>.
11. **STMicroelectronics.** Microcontrollers: STM32F302CB. [Võrgumaterjal] Jaanuar 2017. a. [Tsiteeritud: 3. Mai 2017. a.] <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f302cb.html>.
12. **Vishay Siliconix.** DG4051A, DG4052A, DG4053A Product Information. [Võrgumaterjal] 21. Juuni 2010. a. [Tsiteeritud: 3. Mai 2017. a.] <http://www.vishay.com/docs/69828/dg4051a.pdf>.
13. **Microchip.** MCP2561FD. [Võrgumaterjal] 25. Märts 2014. a. [Tsiteeritud: 5. Mai 2017. a.] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005284A.pdf>.

14. **Nexperia.** P-channel MOSFETs: PMXB65UPE. [Võrgumaterjal] 8. Juuli 2014. a. [Tsitereitud: 3. Mai 2017. a.] <http://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/PMXB65UPE.pdf>.
15. **LPKF Laser & Electronics AG.** ProtoMat S. [Võrgumaterjal] 2011. a. [Tsitereitud: 15. Mai 2017. a.] http://www.lpkf.com/_mediafiles/2406-protomat-s3-serie-manual-.pdf.
16. **Microchip.** MIC5302: Datasheet. [Võrgumaterjal] August 2010. a. [Tsitereitud: 5. Mai 2017. a.] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/mic5302.pdf>.
17. **Horowitz, Paul ja Hill, Winfield.** *The Art of Electronics 3rd Edition*, lk 228 - 230. Cambridge : Cambridge University Press, 2015.
18. **STMicroelectronics.** STM32F302K8: Datasheet. [Võrgumaterjal] Juuli 2016. a. [Tsitereitud: 16. Mai 2017. a.] <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/e4/06/d5/04/58/af/41/14/DM00093333.pdf/files/DM00093333.pdf/jcr:content/translations/en.DM00093333.pdf>.
19. **STMicroelectronics.** Discovery kit with STM32F303VC MCU. [Võrgumaterjal] 2017. a. [Tsitereitud: 14. Mai 2017. a.] <http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f3discovery.html>.
20. **Analog Devices.** AD7193: Datasheet. [Võrgumaterjal] Märts 2013. a. [Tsitereitud: 6. Mai 2017. a.] <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7193.pdf>.
21. **Nexperia.** 74AUP2G14: Datasheet. [Võrgumaterjal] 17. September 2015. a. [Tsitereitud: 6. Mai 2017. a.] <http://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74AUP2G14.pdf>.
22. **Texas Instruments.** Introduction to the Controller Area Network. [Võrgumaterjal] Juuli 2008. a. [Tsitereitud: 5. Mai 2017. a.] <http://www.ti.com/lit/an/sloa101a/sloa101a.pdf>.
23. **Microchip.** TC1015: Datasheet. [Võrgumaterjal] 27. Veebruar 2007. a. [Tsitereitud: 17. Mai 2017. a.] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21335e.pdf>.
24. **Hangzhou Jiepei Information Technology Co., Ltd.** ALLPCB. [Võrgumaterjal] [Tsitereitud: 14. Mai 2017. a.] <http://www.allpcb.com/>.
25. **Atollic .** TrueStudio. [Võrgumaterjal] [Tsitereitud: 16. Mai 2017. a.] <https://atollic.com/truestudio/>.
26. **IAR Systems.** Free Trials. *IAR Embedded Workbench for ARM*. [Võrgumaterjal] 2017. a. [Tsitereitud: 14. Mai 2017. a.] <https://www.iar.com/iar-embedded-workbench/#!?currentTab=free-trials>.
27. **GitLab.** About GitLab. [Võrgumaterjal] [Tsitereitud: 16. Mai 2017. a.] <https://about.gitlab.com/>.
28. **Atlassian.** SourceTree. [Võrgumaterjal] [Tsitereitud: 16. Mai 2017. a.] <https://www.sourcetreeapp.com/>.

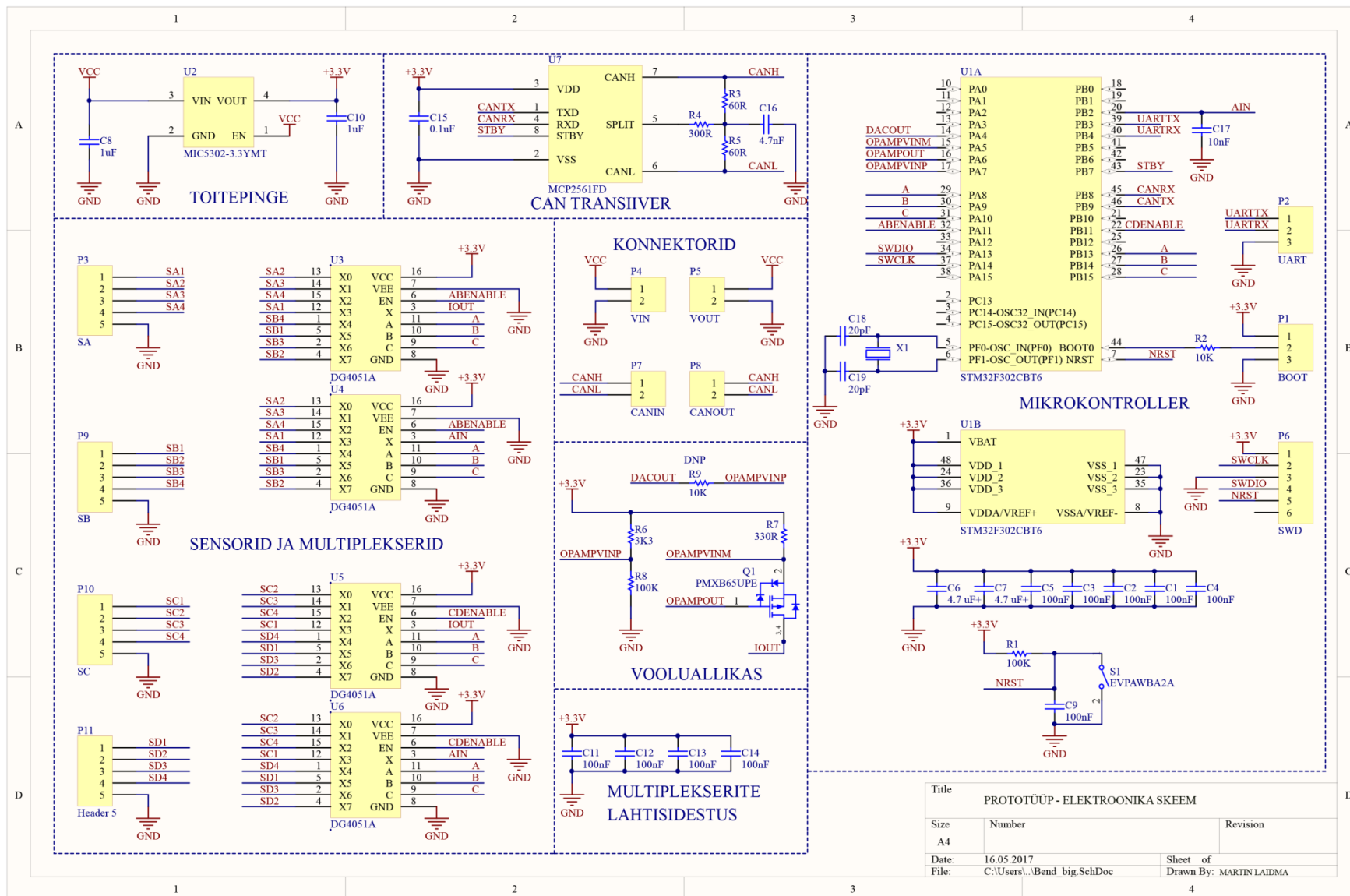
29. **Tatham, Simon.** Putty. [Võrgumaterjal] 29. Aprill 2017. a. [Tsiteeritud: 14. Mai 2017. a.] <http://www.putty.org/>.

30. **Vallaste, Heikki.** e-Teatmik: IT ja sidetehnika seletav sõnaraamat. *CAN (Controller Area Network)*. [Võrgumaterjal] 2017. a. [Tsiteeritud: 14. Mai 2017. a.] <http://www.vallaste.ee/>.

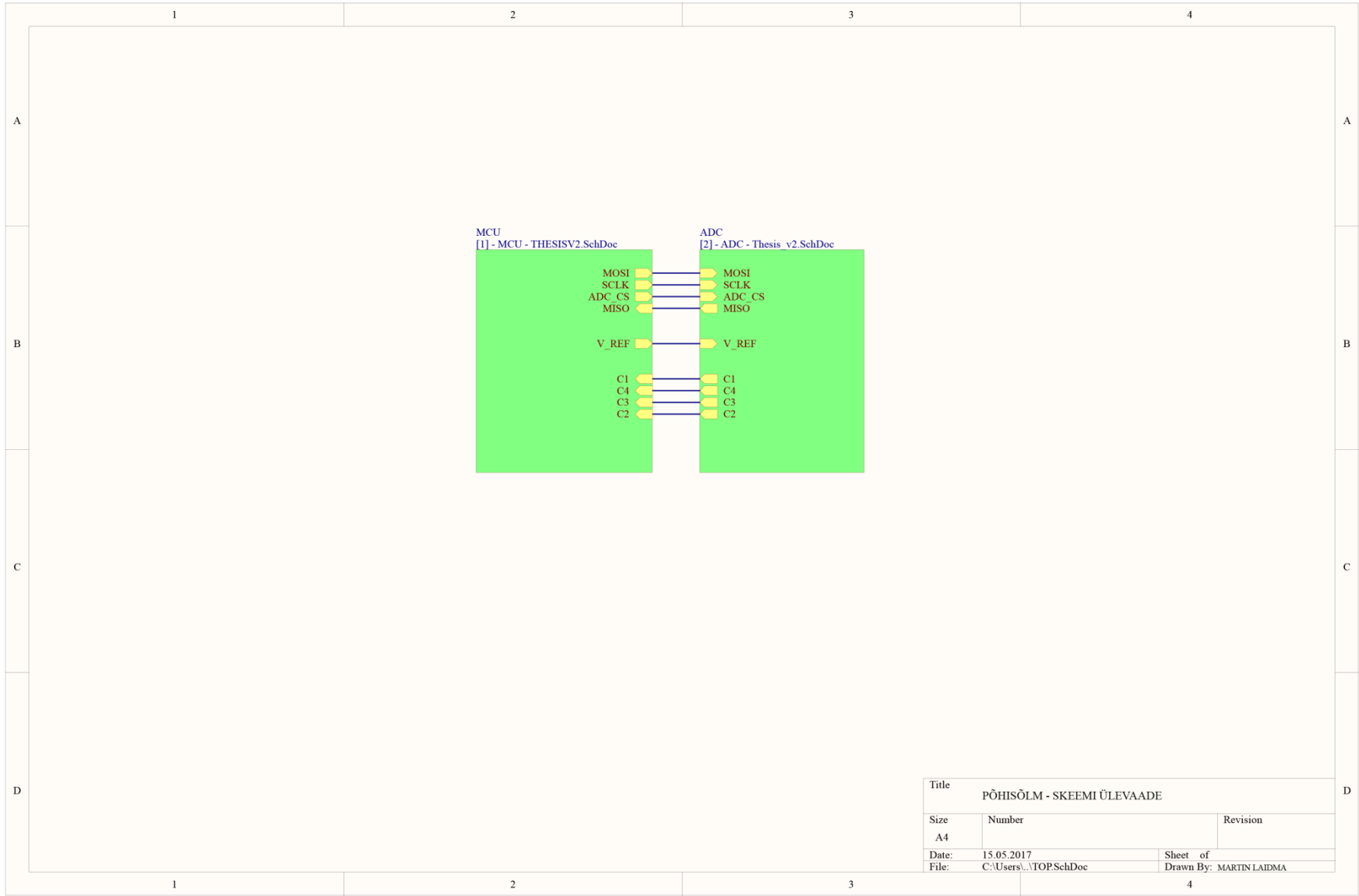
31. **Rohde & Schwarz, Inc.** Hameg HM8118. [Võrgumaterjal] 2017. a. [Tsiteeritud: 15. Mai 2017. a.] https://www.rohde-schwarz.com/us/product/hm8118-productstartpage_63493-44101.html.

32. **B&K Precision Corporation.** 4050 Series: Model 4054. [Võrgumaterjal] 2017. a. [Tsiteeritud: 15. Mai 2017. a.] <http://www.bkprecision.com/products/signal-generators/4054-25-mhz-dual-channel-function-arbitrary-waveform-generator.html>.

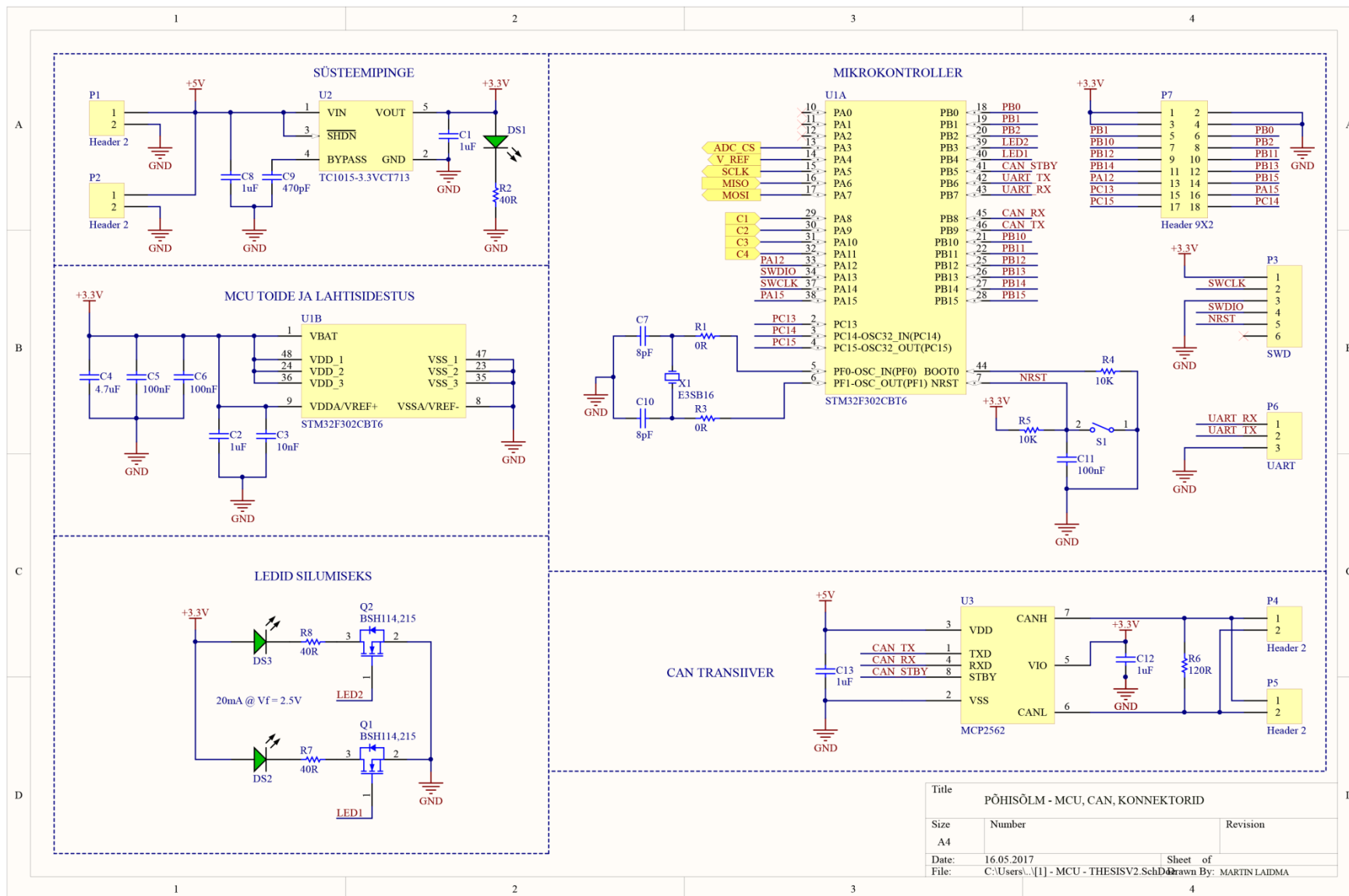
LISA 1. Prototüübi elektroonikaskeem



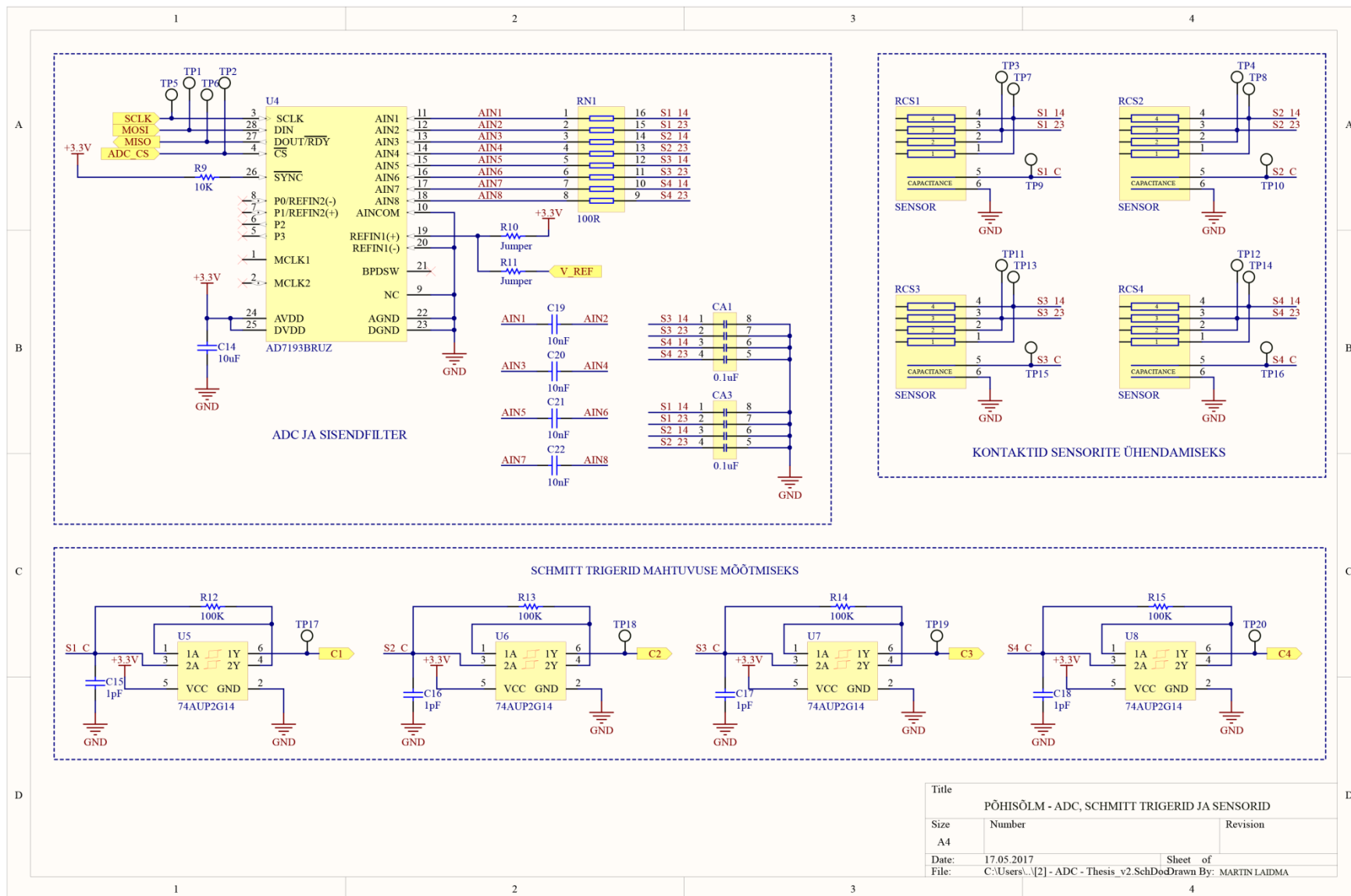
LISA 2. Põhisõlme skeemide ülevaade



LISA 3. Põhisõlme elektroonika: mikrokontroller ja CAN



LISA 4. Põhisõlme elektroonika: ADC, Schmitt trigerid ja sensorid



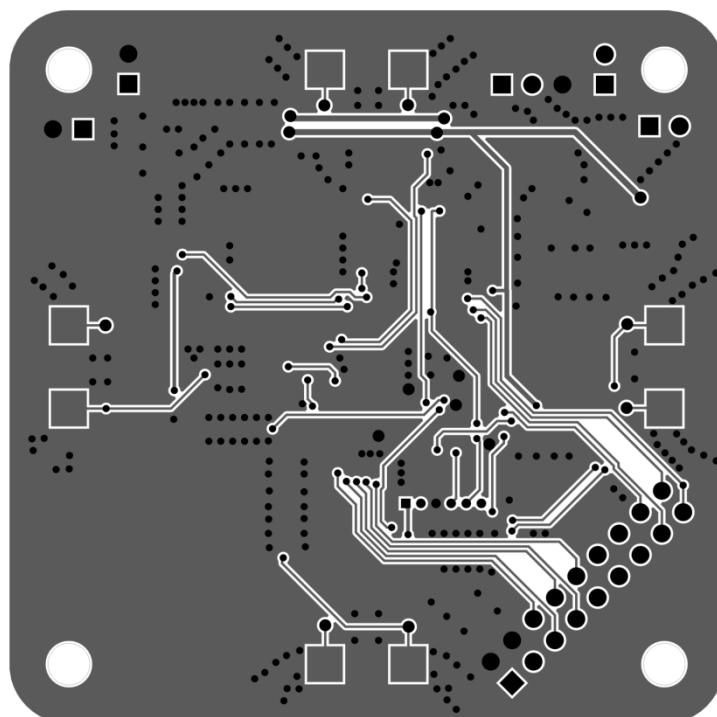
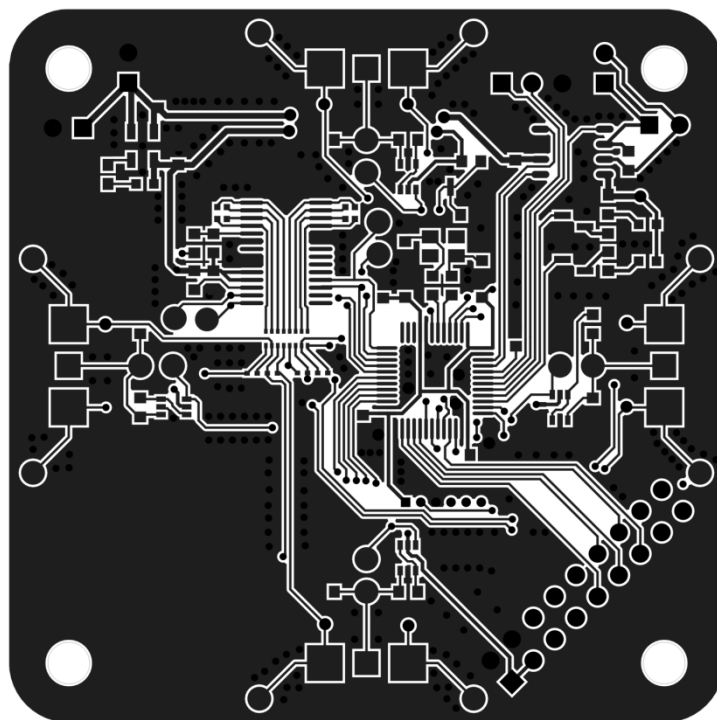
LISA 6. Põhisõlm: elektroonikakomponentide nimekiri

Tähis	Väärtus	Komponent	Korpus
C1, C2, C8, C12, C13	1uF	Kondensaator	0603
C3	10nF	Kondensaator	0603
C4	4.7uF	Kondensaator	0603
C5, C6, C11	100nF	Kondensaator	0603
C7, C10	8pF	Kondensaator	0603
C9	470pF	Kondensaator	0603
C14	10uF	Kondensaator	0603
C15, C16, C17, C18	1pF	Kondensaator	0603
C19, C20, C21, C22	10nF	Kondensaator	0402
CA1, CA3	4 x 0.1uF	Kondensaatormassiiv	4x0402
DS1, DS2, DS3	HSMG-C190	LED, roheline	0603
P1, P2, P4, P5		Pistik, 2 kontakti	HDR1X2
P3		Pistik, 6 kontakti	HDR1x6, 1.27mm
P6		Pistik, 3 kontakti	HDR1X3
P7		Pistik, 18 kontakti	HDR2X9
Q1, Q2	BSH114,215	Transistor	SOT23
R1, R3, R10, R11	0 Ω	Takisti	0603
R2, R7, R8	40 Ω	Takisti	0603
R4, R5, R9	10 000 Ω	Takisti	0603
R6	120 Ω	Takisti	0603
R12, R13, R14, R15	100 000 Ω	Takisti	0603
RCS1, RCS2, RCS3, RCS4		Sensor	Sensor
RN1	8 x 100 Ω	Takistimassiiv	8x0402
S1	EVPAWBA2A	Lüliti	EVPAW
TP1, TP2, TP3, TP4, TP5, TP6, TP7, TP8, TP9, TP10, TP11, TP12, TP13, TP14, TP15, TP16, TP17, TP18, TP19, TP20		Testpunkt	Testpunkt
U1	STM32F302CBT6	Mikrokontroller	LQFP48
U2	TC1015-3.3VCT713	Pingeregulaator	SOT23-5
U3	MCP2562	CAN transiiver	SOIC8
U4	AD7193BRUZ	Analoog-digitaal muundur	TSSOP16
U5, U6, U7, U8	74AUP2G14	Schmitt triger	SOT363
X1	E3SB16	Kristall-ostsillaator	E3SB16

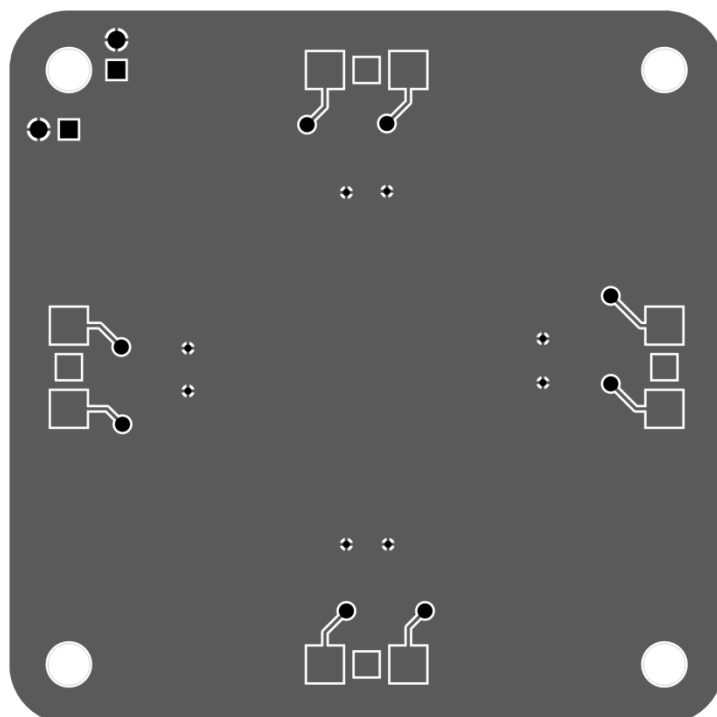
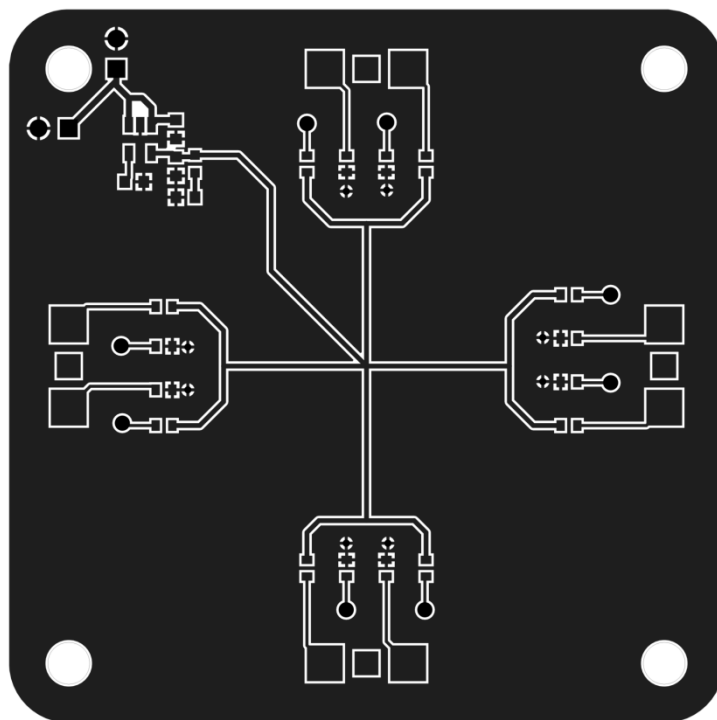
LISA 7. Vahesõlm: elektroonikakomponentide nimekiri

Tähis	Väärtus	Komponent	Korpus
RCS1, RCS2, RCS3, RCS4		Sensor	Sensor
U2	TC1015-3.3VCT713	Pingeregulaator	SOT-23-5
R1, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17	1000 Ω	Takisti	0603
R2	40 Ω	Takisti	0603
C9	470 Ω	Takisti	0603
C1, C8	1 μ F	Kondensaator	0603
DS1	HSMG-C190	LED, roheline	0603
P1, P2		Pistik, 2 kontakti	HDR1X2

LISA 8. Põhisõlm: trükkplaadi pealmine ja alumine kiht



LISA 9. Vahesõlm: trükkplaadi pealmine ja alumine kiht



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Martin Laidma

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Juhtelektroonika loomine mitmeliigiliste deformatsioonisensorite maatriksile“

mille juhendaja on Kaur Leemets

- (a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - (b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 17.05.2017